

ECOLE POLYTECHNIQUE D'ARCHITECTURE ET D'URBANISME D'ALGER -EPAU-

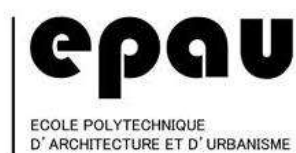
Laboratoire Ville Architecture et Patrimoine -LVAP-

Ecole doctorale en Patrimoine et Cadre bâti ancien

Et

POLITECNICO DI MILANO -POLIMI-

Dipartimento di Architettura, Ambiente Costruito e Ingegneria delle costruzioni -DABC-



THESE DE DOCTORAT EN COTUTELLE INTERNATIONALE

Intitulée :

LES CARACTERISTIQUES STRUCTURELLES DES MAISONS DE LA CASBAH D'ALGER (TESTS ET SIMULATIONS)

Présentée et soutenue par

Mr. Mohamed Amine ZOUAOUI

Devant le jury composé de :

Professeur Youcef CHENNAOUI : EPAU-LVAP

Professeur Youcef SI YUCEF : EPAU-LVAP

Professeur Boualem DJEBRI : EPAU-LVAP (Directeur de thèse)

Professeure Scira MENONI: POLIMI- DABC

Professeur Marco SCAIONI: POLIMI- DABC

Professeur Antonio CAPSONI: POLIMI- DABC (Directeur de thèse)

Année universitaire 2020-2021

Remerciements

La réalisation de ma thèse de doctorat est une aventure de mille et une couleurs durant laquelle la résistance, l'acharnement et la volonté pléthorique furent son carburant. Plusieurs atterrissages ont eu lieu sur des terres inconnues pour restituer peu à peu les pièces maîtresses d'un puzzle conducteur à ma destination finale.

Il serait toutefois ingrat de ma part de ne pas exprimer ma profonde reconnaissance et gratitude vis-à-vis des personnes et institutions qui ont contribué à cette aventure unique.

Je remercie tout d'abord le bon Dieu tout puissant de m'avoir accordé la force, le soutien et le courage nécessaires pour achever profusément mon travail de recherche.

J'exprime ma gratitude à mes deux directeurs de thèses, les Professeurs Boualem DJEBRI de l'Ecole Polytechnique d'Architecture et d'urbanisme d'Alger EPAU et Antonio CAPSONI du Politecnico di Milano POLIMI pour leur confiance qui m'a été amplement octroyée ainsi que leur disponibilité.

Je remercie profondément mes deux institutions d'inscription à savoir : l'Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme d'Alger EPAU ainsi que le Politecnico di Milano POLIMI d'avoir mis à ma disposition les moyens humains et matériels nécessaires pour la préparation de la thèse.

Je gratifie le Laboratoire Ville Architecture et Patrimoine LVAP ainsi que les membres du Comité de Formation Doctorale en particulier le Docteur Nabila CHERIF, le Docteur Kenza BOUSSOURA et le Professeur Youcef CHENNAOUI pour leurs séminaires dispensés ainsi que leur disponibilité.

Un très grand merci pour le Département Architecture, environnement Construit et ingénierie de la Construction DABC relevant du POLIMI de m'avoir accompagné coude à coude dès mon premier jour d'inscription jusqu'à l'achèvement de ma thèse. Aussi, je souhaiterais exprimer mon profond respect aux membres du service de doctorat : Monsieur Alessandro Martinelli, Madame Ilaria Muratori et Madame Cristina Marchegiani ainsi que les responsables de la formation doctorale les Professeurs Enrico DI ANGESLIS et Marco SCAIONI pour leur soutien et disponibilité prouvés tout le long de mon cursus.

Je remercie également mes Professeurs enseignants à POLIMI : le Docteur Fabrizio BANFI, le Professeur Virginio QUAGLINI, le Professeur Claudio CHESI qui ont corrigé et validé mes examens et tous ceux qui m'ont accepté chaleureusement dans leurs séminaires pour approfondir mes connaissances. A ce titre je nommerai : la Professeure Giuliana CARDANI, la Professeure Elisabetta ROSINA et le Professeur Lorenzo CANTINI.

Je remercie infiniment le Gouvernement Italien de m'avoir octroyé une bourse d'études de mérite pour pouvoir approfondir et achever ma thèse de doctorat.

Je remercie les Membres du jury d'avoir lu, examiné et évalué mon travail de recherche.

Je tiens à exprimer un profond remerciement et un respect conséquent au Professeure Tsouria BABA-AHMED, Directrice Générale de l'EPAU pour sa généreuse disponibilité, son soutien

incontestable durant des moments rudes et ardues et d'être à l'origine de ma thématique de recherche.

Je souhaiterais gratifier profondément Madame Rachida ZEKAGH, Vice-Directrice des relations extérieures de l'EPAU pour son accompagnement avéré et son soutien inépuisable, Dieu seul sait combien de fois j'ai frappé à son bureau dont la porte m'a toujours été grande ouverte avec sourire et enthousiasme.

Asma HADJILLAH, je ne pourrais pas faire passer inaperçue cette occasion pour lui exprimer mon remerciement pour sa précieuse aide.

Je tiens à remercier tous les membres du centre archivistique du Bastion 23 pour leur aimable disponibilité.

Je voudrais exprimer une profonde reconnaissance aux membres du laboratoire technique des matériaux du Politecnico di Milano : Madame Claudia TIRABOSCHI, Monsieur Marco CUCCHI et Monsieur Massimo ISCANDRI de m'avoir accompagné durant mon travail expérimental et pour leurs précieux conseils et orientations.

Je désire exprimer ma très grande reconnaissance au Professeur Gabriele MILANI de m'avoir accordé généreusement l'accès à sa Workstation pour le développement de mes simulations structurelles.

Je remercie un par un tous mes chers amis que je n'oublierai jamais qui ont agrémenté de près ou de loin mon aventure pour qu'elle soit unique par leur aide, par leur soutien et par leur humour. Je nommerai Paulo, Jacopo, Karrar, Salam, Fengzhen, Khari, Andrea, Danilo, Stefano, Muhammed, Linda, Chahinez, Jesse, Daniel, Sihem, Nora, Giacomo JD et Diego.

Il m'est important d'exprimer mon profond respect et mon immense remerciement aux habitants de la Casbah d'Alger et aux propriétaires des maisons : Ami Mustapha, Boualem, Djamel Meddour, Djamel Madrid de m'avoir accueilli chaleureusement dans leur maisons pour la réalisation des relevés techniques, que Dieu les bénisse.

Je souhaiterais consacrer cette fin pour remercier particulièrement et infiniment ma chère et unique famille : mes parents, mes deux frères, ma belle-sœur pour leur soutien moral continu tout au long de cette aventure durant mes moments laborieux et pour leurs encouragements. Que Dieu les protège.

Je dédie une attention particulière à ma grand-mère maternelle que Dieu la protège ainsi qu'aux membres de ma famille qui m'ont été chers et qui ne font plus partie de notre monde, ma Grand-mère paternelle et mon Oncle qui m'ont soutenu et encouragé chacun à sa manière. Paix sur vos âmes.

M.A ZOUAOUI

Table des matières

REMERCIEMENTS.....	III
TABLE DES MATIERES	V
RESUME.....	XI
ABSTRACT	XII
RIASSUNTO.....	X
ملخص.....	X
INTRODUCTION GENERALE	1

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTERATURE

1.1 PROJET DE THESE	5
1.1.1 Introduction	6
1.1.2 Problématique générale	10
1.1.3 Principaux objectifs de la recherche.....	10
1.1.4 Nouveauté et intérêt de la recherche	11
1.1.5 Processus méthodologique	11
1.1.6 Mots clefs	12
1.2 REVUE DE LITTERATURE	13
1.2.1 Introduction	14
1.2.2 Thématique de recherche et problématique générale.....	15
1.3 PROTOCOLE METHODOLOGIQUE GENERAL.....	29
1.3.1 Introduction	30
1.3.2 Protocole méthodologique spécifique	30
1.3.2.1 Description du processus méthodologique	36
1.3.2.2 Outils et Matériels spécifiques	38
1.4 CONCLUSION.....	40

CHAPITRE 2

INVESTIGATIONS IN-SITU

2.1 ANALYSE URBAINE.....	41
2.1.1 Introduction	42
2.1.2 Sous-secteurs de la Casbah d'Alger	43
2.1.3 De la typologie architecturale à la classification des agrégats	45
2.2 SELECTION DU CAS D'ETUDE	51
2.2.1 Introduction	52
2.2.2 Critères de sélection	52
2.2.3 Présentation du cas d'étude	53
2.3 RELEVES TECHNIQUES	56
2.3.1 Introduction	57

2.3.2 Relevé architectural par laser scanner 3D	57
2.3.2.1 Méthodologie de l'investigation in-situ.....	57
2.3.2.2 Assemblage des nuages de points.....	58
2.3.3 Relevé photographique par caméra 3D	60
2.3.4 Relevé de l'état de conservation.....	60
2.3.4.1 Description	60
2.3.4.2 Présentation du relevé technique	61
2.4 PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS	67
2.4.1 Présentation du site de prélèvement	68
2.4.2 Description des échantillons.....	68
2.3 CONCLUSION.....	71

CHAPITRE 3

MODELISATION ARCHITECTURALE

3.1 INTRODUCTION	72
3.2 GRADES OF GENERATION GoG	75
3.3 DU NUAGE DE POINTS A LA MODELISATION DE L'INFORMATION DES BATIMENTS HISTORIQUES HBIM.....	77
3.4 MODELE ARCHITECTURAL: ANALYSE DE STRATIFICATION ARCHITECTURALE	80
3.5 MODELE STRUCTUREL : MODELISATION PAR ELEMENTS FINIS FEM.....	82
3.6 CONCLUSION.....	86

CHAPITRE 4

TESTS DE LABORATOIRE

4.1 INTRODUCTION	87
4.2 TESTS MECANIQUES DESTRUCTIFS.....	90
4.2.1 Méthodologie	91
4.2.1.1 Méthodes	91
4.2.1.2 Préparation des échantillons	91
4.2.1.2.1 Briques en terre cuite	92
4.2.1.2.2 Bois de Thuja	96
4.2.1.3 Acquisition des données	98
4.2.1.3.1 Module de Young par application d'extensomètres de type A	98
4.2.1.3.2 Système Optique par vidéo caméra	100
4.2.1.4 Résultats	104
4.2.1.4.1 Module d'Young des briques en terre cuite par application d'extensomètres de type A (DD1)	104
4.2.1.4.2 Résistance à la compression des briques en terre cuite.....	106
4.2.1.4.3 Système optique par Vidéo caméra	107
4.2.1.4.3.1 Des pixels aux micromillimètres: module de Young et coefficient de Poisson	107
4.2.1.4.3.2 Module de Young des briques en terre cuite par application d'extensomètres de type B (LVDT).....	113

4.2.1.4.3.3 Confrontation des résultats : Système Optique VS extensomètre de type B (LVDT).....	113
4.2.1.4.3.4 Trajectoire des points de référence (à compléter)	114
4.2.1.4.4 Module de Young du bois de Thuja par application d'extensomètres de type B (LVDT)	115
4.2.1.4.5 Résistance à la compression du bois de Thuja.....	117
4.2.2 Discussion	118
4.2.3 Conclusion.....	119
4.2 TESTS MECANQUES SEMI-DESTRUCTIFS	121
4.3.1 Méthodologie	122
4.3.1.1 Méthodes	122
4.3.1.2 Applications.....	122
4.3.1.2.1 Application du pénétromètre	122
4.3.1.2.2 Application du résistographe	123
4.3.1.3 Résultats	123
4.3.1.3.1 Application du Pénétromètre	123
4.3.1.3.2 Application du résistographe	126
4.3.2 Discussion	128
4.3.3 Conclusion.....	128
4.4 TESTS MECANQUES NON-DESTRUCTIFS	130
4.4.1 Méthodologie	131
4.4.1.1 Méthodes	131
4.4.1.2 Application	131
4.4.1.2.1 Capteur d'humidité.....	131
4.4.1.2.2 Tests ultrasoniques.....	132
4.4.1.3 Résultats	132
4.4.1.3.1 Capteur d'humidité.....	132
4.4.1.3.2 Tests ultrasoniques.....	133
4.4.1.3.2.1 Application sur les briques en terre cuite	133
4.4.1.3.2.2 Application sur le bois de Thuya.....	133
4.4.2 Discussion	134
4.4.3 Conclusion.....	135
4.5 CALCUL D'INCERTITUDE	136
4.5.1 Module de Young : briques en terre cuite	137
4.5.2 Résistance à la compression : briques en terre cuite	139
4.5.3 Module de Young : bois de Thuja.....	140
4.5.4 Résistance à la compression : bois de Thuja	141
4.5.5 Test au pénétromètre	142
4.6 CONCLUSION.....	143

CHAPITRE 5

ANALYSE STRUCTURELLE

5.0 INTRODUCTION	144
5.1 ANALYSE LINEAIRE STATIQUE (LSA)	148
5.1.1 Introduction	149

5.1.2 Présentation du modèle structurel	149
5.1.3 Calcul des charges statiques	151
5.1.3.1 Charges permanentes et d'exploitation.....	152
5.1.3.2 Charges géostatiques	155
5.1.5 Analyse Linéaire Statique: résultats	159
5.2 ANALYSE PUSHOVER (PA): THEORIE	162
5.2.1 Introduction	163
5.2.2 Analyse Pushover: théorie.....	164
5.2.2.1 Définition.....	165
5.2.2.2 Approche du degré de liberté unique (SDOF).....	166
5.2.2.3 PA et la Méthode de Capacité Spectrale CSM	167
5.2.2.4 Déplacement cible	169
5.2.2.5 Points de contrôle CP	170
5.2.3 Analyse Pushover : considérations.....	170
5.2.3.1 Propriétés mécaniques des matériaux de construction	170
5.2.3.2 Charges	173
5.2.3.2.1 Charges permanentes et d'exploitation.....	173
5.2.3.2.2 Charges géostatiques.....	173
5.2.3.2.3 Charges sismiques.....	173
5.2.3.3 Planchers.....	175
5.2.4 Méthodologie	175
5.3 ANALYSE MODALE ET ANALYSE LINEAIRE PUSHOVER (LPA)	177
5.3.1 Introduction	178
5.3.2 Modèle structurel.....	178
5.3.3 Analyse modale : résultats.....	179
5.3.4 Analyse Pushover linéaire.....	182
5.3.4.1 Calcul des charges	182
5.3.4.2 Charges sismiques	183
5.3.4.3 Analyse Linéaire Pushover : résultats	183
5.4 ANALYSE PUSHOVER NON-LINEAIRE: APPLICATION	186
5.4.1 Introduction	187
5.4.2 Calcul des charges.....	187
5.4.2.1 Charges verticales.....	187
5.4.2.2 Charges géostatiques	187
5.4.2.3 Calcul des charges sismiques	189
5.4.2.3.1 Considérations	189
5.4.2.3.1.1 Coefficient d'accélération (A)	189
5.4.2.3.1.2 Classification du type de sol.....	189
5.4.2.3.1.3 Classification du cas d'étude.....	189
5.4.2.3.2 Charges sismiques horizontales	189
5.4.3 Propriétés des matériaux de construction.....	190
5.4.4 Points de contrôle	191
5.4.5 Résultats	192
5.4.5.1 Comportement général : agrégat complet.....	192
5.4.5.1.1 Discussion.....	201

5.4.5.1.2 Conclusion	206
5.4.5.2 Maisons désagrégées	207
5.4.5.2.1 Unité constructive (UC) 01	208
5.4.5.2.2 Unité Constructive (UC) 02	214
5.4.5.2.3 Unité Constructive (UC) 03	220
5.4.5.2.4 Unité Constructive (UC) 04	226
5.4.5.2.5 Discussion	233
5.4.5.2.6 Conclusion	241
5.5 CONCLUSION.....	244

CHAPITRE 6

PROPOSITION D'INTERVENTION STRUCTURELLE

6.0 INTRODUCTION GENERALE.....	245
6.1 CHARTES DE RESTAURATION.....	247
6.1.1 Introduction	248
6.1.2 Chartes de restauration	248
6.1.2.1 Types de restauration architecturale	248
6.1.2.2 Genèse des chartes de restauration	250
6.1.3 Recommandations des chartes de restauration	255
6.1.4 Conclusion.....	256
6.2 TECHNIQUES DE LA REHABILITATION STRUCTURELLE	257
6.2.1 Introduction	258
6.2.2 Recommandations d'intervention structurelle	258
6.2.3 Présentation des techniques de réhabilitation structurelle.....	259
6.2.3.1 Système FRCM	259
6.2.3.1.1 Présentation.....	259
6.2.3.1.2 Avantages.....	260
6.2.3.1.3 Application.....	261
6.2.3.2 Système d'ancrage	265
6.2.3.2.1 Présentation.....	265
6.2.3.2.2 Avantages.....	266
6.2.3.2.3 Application.....	267
6.2.3.3 Système de tirants.....	269
6.2.3.3.1 Présentation.....	269
6.2.3.3.2 Avantages.....	271
6.2.3.3.3 Application.....	272
6.2.4 Conclusion.....	273
6.3 APPLICATION DE LA TECHNIQUE DE REHABILITATION STRUCTURELLE	274
6.3.1 Introduction	275
6.3.2 Application du système à tirants à l'agrégat	275
6.3.2.1 Configuration du système.....	275
6.3.2.2 Paramétrage du système	277
6.3.2.3 Résultats de l'Analyse par Eléments Finis post-intervention (à compléter)	278
6.3.2.4 Discussion.....	282
6.3.2.5 Conclusion.....	283

6.3.3 Catalogue des mécanismes de repture locaux des agrégats de type compact	283
6.4 CONCLUSION.....	286
CONCLUSION GENERALE	287
I LISTE DES FIGURES.....	292
II LISTE DES TABLEAUX.....	299
III REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	301
IV ANNEXES	312

Résumé

L'organisation des tissus urbains traditionnels en agrégats est l'une des caractéristiques principales des architectures vernaculaires telle que la Casbah d'Alger. Cette dernière a connu une reconstruction quasi-totale à la suite du séisme de 1716. Compte tenu la configuration en macrostructure des maisons, diverses techniques empiriques et préventives ont été employées afin de réduire la vulnérabilité sismique des maisons dont l'efficacité demeure scientifiquement indémontrée. A travers une recherche pluridisciplinaire, nous étudions les caractéristiques structurelles des maisons de la Casbah d'Alger regroupées sous forme d'une catégorie d'agrégat compact. Nous procédons tout d'abord par une caractérisation mécanique des matériaux de construction historiques suivie d'une série d'analyses structurelles par éléments finis à l'état statique et sismique à différentes échelles. Une contribution historiographique, méthodologique et opérationnelle est proposée afin de redorer le blason du centre historique et assurer sa pérennité. Pour cela, nous proposons un processus méthodologique complet et pluridisciplinaire d'un projet de réhabilitation structurelle d'un agrégat authentique depuis la numérisation 3D in-situ jusqu'à la proposition d'intervention structurelle. Tout d'abord, une analyse urbaine met en exergue trois catégories distinctes d'agrégat permettant la sélection d'un cas d'étude représentatif. Ce dernier fait l'objet d'une série de relevés techniques dont l'application de la lasergrammétrie 3D, permettant l'obtention de 188 scans. Le nuage de points généré constitue une référence essentielle lors du processus de modélisation 3D fondé sur les dix *grades of generation* et sur une série de logiciels basés sur le BIM et les NURBS. Par ailleurs, une caractérisation mécanique par le biais de tests destructifs, semi-destructifs et non destructifs, est effectuée sur des échantillons historiques de briques en terre cuite, de mortier de chaux et d'argile et des rondins de *Thuja*. Cette étape révèle des valeurs supérieures à celles suggérées dans la littérature et permet d'enrichir la base de données relative aux propriétés des matériaux de construction des maisons de la Casbah d'Alger. Une Modélisation par Eléments Finis FEM paramétrée est réalisée donc grâce au modèle HBIM obtenu avec haut degré de précision ainsi que les caractéristiques mécaniques des matériaux de construction. Différentes analyses sont entreprises dont l'Analyse Lineaire Statique LSA, l'analyse Modale AM et l'Analyse Pushover PA considérant différentes configurations de l'agrégat : avec et sans diaphragmes horizontaux rigides ; 2) à l'état agrégé et désagrégé. Les résultats démontrent clairement une meilleure réponse structurelle de l'agrégat à l'état agrégé plutôt que désagrégé avec la présence de plusieurs mécanismes de repture locaux. Ces derniers font l'objet d'une proposition de mise à niveau structurelle ciblée afin d'améliorer les performances structurelles de cette catégorie d'agrégat et de réduire par conséquent sa vulnérabilité sismique. Trois stratégies distinctes sont proposées en concordance avec les recommandations des chartes internationales de restauration ainsi que celles issues des résultats des différentes simulations numériques. Le système à tirants est retenu comme étant la technique la plus avantageuse et fait l'objet d'une autre analyse structurelle sismique post-intervention. Cette dernière démontre une réduction considérable de la vulnérabilité sismique de l'agrégat dans toutes les directions confondues. Le projet de réhabilitation structurelle, constituant un guide complet et une référence pour les architectures vernaculaires, est achevé par un catalogue référentiel des mécanismes de repture locaux des agrégats de type compact.

Mots clés

Architecture Vernaculaire - Casbah d'Alger - Agrégat - Laser scanner 3D - HBIM – NURBS - Tests mécaniques destructifs et non destructifs - FEA - Réhabilitation structurelle.

Abstract

The organization of traditional urban fabrics into aggregates is one of the main characteristics of vernacular architectures such as the Kasbah of Algiers. The latter underwent an almost total reconstruction after the 1716 earthquake. Beyond the macrostructure configuration of the houses, various empirical and preventive techniques were used to reduce the seismic vulnerability of the houses, the effectiveness of which scientifically remains undemonstrated. Through multidisciplinary research, we study the structural characteristics of the houses of the Kasbah of Algiers connected in the form of a compact aggregate category. We first proceed with a mechanical characterization of historic building materials followed by a series of static and seismic finite element structural analyzes at different scales. A historiographical, methodological and operational contribution is proposed in order to restore the image of the historic center and ensure its sustainability. For this, we propose a complete and multidisciplinary methodological process of a structural rehabilitation project of an authentic aggregate from in-situ 3D scanning to the proposal for structural intervention. First, an urban analysis highlights three distinct categories of aggregate allowing the selection of a representative case study. The latter is the subject of a series of technical surveys including the application of 3D lasergrammetry allowing 188 scans to be obtained. The generated point cloud is an essential reference during the 3D modeling process based on the ten Grades of Generation and on a series of software based on BIM and NURBS. In addition, mechanical characterization through destructive, semi-destructive and non-destructive tests is carried out on samples of historical terracotta bricks, lime and clay mortar and *Thuja* logs. This step reveals values higher than those suggested in the literature and enriches the database of the properties of building materials for houses in the Kasbah of Algiers. Parameterized Finite Element Modeling FEM is therefore carried out thanks to the HBIM model obtained with a high degree of accuracy as well as the mechanical characteristics of building materials. Different analyzes are undertaken including Static Linear Analysis LSA, Modal Analysis MA and Pushover Analysis PA considering different configurations of the aggregate: with and without rigid horizontal diaphragms; in the aggregate and disaggregated state. The results clearly demonstrate a better structural response of the aggregate at the aggregated state rather than the disaggregated one highlighting several local collapse mechanisms. These are the subject of a targeted structural upgrade proposal in order to improve the structural performance of this category of aggregate and consequently reduce its seismic vulnerability. Three distinct strategies are proposed in accordance with the recommendations of international restoration charters as well as those resulting from the various structural numerical simulations. The tie rod system is chosen as the most advantageous technique and is the subject of another post-intervention seismic structural analysis. The latter demonstrates a considerable reduction in the seismic vulnerability of the aggregate in all directions. The structural rehabilitation project constituting a complete guide for vernacular architectures, is completed by a reference catalog of the local collapse mechanisms of compact type aggregates.

Key words

Vernacular Architecture - Kasbah of Algiers - Aggregate - 3D laser scanner - HBIM - NURBS- Destructive and non-destructive mechanical tests - FEA - Structural rehabilitation.

Riassunto

L'organizzazione dei tessuti urbani tradizionali in aggregati è una delle caratteristiche principali delle architetture vernacolari come la Casbah di Algeri. Quest'ultima ha subito una ricostruzione pressoché totale in seguito al terremoto del 1716. Tenuta la configurazione macrostrutturale delle abitazioni, sono state utilizzate varie tecniche empiriche e preventive per ridurre la vulnerabilità sismica delle abitazioni, la cui efficacia rimane scientificamente non dimostrata. Attraverso una ricerca multidisciplinare, studiamo le caratteristiche strutturali delle case della Casbah di Algeri sotto forma di una categoria di aggregati compatti. Si procede prima con una caratterizzazione meccanica dei materiali da costruzione storici seguita da una serie di analisi strutturali agli elementi finiti statiche e sismiche a diverse scale. Si propone il processo di un progetto di riabilitazione strutturale di un autentico aggregato dalla scansione 3D in sito alla proposta di intervento strutturale, fornendo un contributo storiografico, metodologico e operativo volto a ripristinare l'immagine del centro storico e garantirne la perennità. Si è partita da un'analisi urbana che ha evidenziato tre categorie distinte di aggregati che consentono la selezione di un caso di studio rappresentativo. Quest'ultimo è oggetto di una serie di rilievi tecnici tra cui l'applicazione del laser scanning 3D che ha permesso di ottenere 188 scansioni dell'area. La nuvola di punti generata dalle scansioni è stata un riferimento essenziale durante il processo di modellazione 3D basato sui dieci Grades of Generation e su una serie di software basati su BIM e NURBS. Si è poi eseguita la caratterizzazione meccanica mediante prove distruttive, semi distruttive e non distruttive sui seguenti campioni storici: mattoni in terracotta, malta di calce e argilla e tronchi di *Thuja*. Questo step rivela valori superiori a quelli suggeriti in letteratura e permette di arricchire il database relativo alle proprietà dei materiali da costruzione delle case della Casbah di Algeri. La Modellazione agli Elementi Finiti FEM parametrizzata viene quindi realizzata grazie al modello HBIM ottenuto con un alto grado di precisione oltre che alle caratteristiche meccaniche dei materiali da costruzione. Vengono condotte diverse analisi tra cui l'Analisi Statica Lineare LSA, l'Analisi Modale AM e l'Analisi Pushover PA considerando differenti configurazioni dell'aggregato: con e senza diaframmi orizzontali rigidi; nello stato aggregato e disaggregato. I risultati dimostrano chiaramente una migliore risposta strutturale dell'aggregato allo stato aggregato piuttosto che disaggregato evidenziando diversi meccanismi di collasso locale. Quest'ultimi sono oggetto di una proposta mirata di ammodernamento strutturale al fine di migliorare le prestazioni strutturali di questa categoria di aggregati e di conseguenza ridurre la vulnerabilità sismica. Infine, si propongono proposte tre distinte strategie in accordo con le raccomandazioni delle carte internazionali del restauro e quelle risultanti dalle varie simulazioni strutturali numeriche. Il sistema di tiranti è stato scelto come la tecnica più vantaggiosa ed è stato oggetto ad un'ulteriore analisi strutturale sismica post-intervento. Quest'ultima mostra una notevole riduzione della vulnerabilità sismica dell'aggregato in tutte le direzioni. Il progetto di riabilitazione strutturale, che costituisce una guida completa per le architetture vernacolari, è completato da un catalogo di riferimento dei meccanismi di collasso locale degli aggregati di tipo compatto.

Parole chiavi

Architettura vernacolare - Casbah di Algeri - Aggregato - Laser scanner 3D - HBIM - NURBS - Prove meccaniche distruttive e non distruttive - FEA - Riabilitazione strutturale.

ملخص

يعد تنظيم النسيج العمراني الحضري التقليدي على شكل بنايات مجمعة أحد سمات الهندسة المعمارية المحلية مثل قصبة الجزائر العاصمة. خضعت الأخيرة لعملية إعادة إعمار شبه كاملة في أعقاب الزلزال الذي وقع عام 1716. بخلاف التكوين المجمع للمنازل ، تم استخدام تقنيات تجريبية ووقائية مختلفة للحد من الضعف الزلزالي للمنازل ، والتي لا تزال فعاليتها غير واضحة. من خلال البحث متعدد التخصصات ، ندرس الخصائص الهيكلية لبيوت قصبة الجزائر في شكل فئة مجمعة و مدمجة. نشرع أولاً في الوصف الميكانيكي لمواد البناء التاريخية متبوعاً بسلسلة من التحليلات الهيكلية للعناصر المحدودة في الحالة الثابتة و الزلزالية على مستويات مختلفة.

تم اقتراح مساهمة تاريخية ومنهجية وتشغيلية من أجل استعادة صورة المركز التاريخي وضمان استدامته. لهذا الغرض ، نقترح عملية منهجية كاملة ومتعددة التخصصات لمشروع إعادة التأهيل الهيكلي لمنازل مجمعة أصيلة من الرقمنة ثلاثية الأبعاد المأخوذة مباشرة من الموقع إلى اقتراح الترميم الهيكلي .

أولاً ، يسلط التحليل الحضري الضوء على ثلاث فئات متميزة من المجمعات المنزلية والذي ساهم في اختيار حالة دراسة تمثيلية. هذا الأخير هو موضوع سلسلة من المسوحات التقنية بما في ذلك تطبيق قياس الليزر ثلاثي الأبعاد الذي يسمح بالحصول على 188 عملية مسح ضوئي. تعد سحابة النقاط التي تم إنشاؤها مرجعاً أساسياً أثناء عملية النمذجة ثلاثية الأبعاد استناداً إلى الدرجات العشر للإنشاء وعلى سلسلة من البرامج القائمة على BIM و NURBS.

بالإضافة إلى ذلك ، يتم إجراء الوصف الميكانيكي من خلال الاختبارات المدمرة وشبه المدمرة وغير المدمرة على عينات من طوب التراكوتا والجير والملاط الطيني وجذوع اشجار "الثويا". تكشف هذه الخطوة عن قيم أعلى من تلك المقترحة في الأدبيات ونتيح إثراء قاعدة البيانات المتعلقة بخصائص مواد البناء لمنازل قصبة الجزائر العاصمة.

يتم تنفيذ نمذجة العناصر المحدودة FEM ذات المعاملات بفضل نموذج HBIM الذي تم الحصول عليه بدرجة عالية من الدقة بالإضافة إلى الخصائص الميكانيكية لمواد البناء. يتم إجراء تحليلات مختلفة بما في ذلك التحليل الخطي الثابت LSA والتحليل النموذجي AM و التحليل الزلزالي PA مع الأخذ بعين الاعتبار التكوينات المختلفة للمجمعات: (1) مع وبدون أغشية أفقية صلبة (2) في الحالة الإجمالية والمفصلة. تظهر النتائج بوضوح استجابة هيكلية أفضل للمنازل في الحالة المجمعة بدلاً من الحالة المنفصلة مع وجود العديد من آليات الانهيار المحلية. هذه الأخيرة هي موضوع اقتراح ترقية هيكلية مستهدفة من أجل تحسين الأداء الهيكلي لهذه الفئة من المجمعات وبالتالي تقليل قابليتها للتأثر بالزلازل. تم اقتراح ثلاث استراتيجيات متميزة وفقاً لتوصيات ميثاق الترميم الدولية وكذلك تلك الناتجة عن نتائج عمليات المحاكاة العددية المختلفة. يتم اختيار نظام قضيب الربط باعتباره الأسلوب الأكثر فائدة وهو موضوع تحليل هيكل زلزالي آخر بعد التدخل. يوضح هذا الأخير انخفاضاً كبيراً في الضعف الزلزالي للمنازل المجمعة في جميع الاتجاهات. يتم الانتهاء من مشروع إعادة التأهيل الهيكلي الذي يشكل دليلاً كاملاً ومرجعاً للمعماريات المحلية التقليدية ، من خلال كتالوج مرجعي لآليات الانهيار المحلية للمنازل المجمعة.

الكلمات الدالة

العمارة المحلية التقليدية - قصبة الجزائر - بنايات مجمعة - الماسح الضوئي بالليزر ثلاثي الأبعاد - HBIM - الاختبارات الميكانيكية المدمرة - الاختبارات الميكانيكية غير المدمرة - FEA - إعادة التأهيل الإنشائي.

Introduction générale

La Casbah d'Alger, un site exceptionnel installé amplement sur le mont de Bouzaréah et surplombant la troisième plus belle baie du monde, fût le carrefour de diverses civilisations antiques, une source d'inspiration pour les artistes et une ville de mystères et d'énigmes pour les architectes et bâtisseurs. Un patrimoine mondial depuis 1992 qui, depuis plusieurs décennies, tente à maintenir sa pérennité et dévoiler la richesse de son architecture mauresque arabo-andalouse, son urbanisme labyrinthique avec ses ruelles cicatrisées par les diverses tragédies historiques, sans oublier ses percées offrant un spectacle aux visiteurs et des vues panoramiques hors du temps sur la mer Méditerranée et le golf d'Alger.

L'ancienne médina est un complexe urbain complet qui compte diverses typologies architecturales de maisons, de mosquées, de mausolées, de bains, de commerces...etc. Elle représente la manifestation tangible d'un savoir-faire local unique issu du mode de vie algérois d'antan permettant l'apparition d'une Architecture Vernaculaire exceptionnelle. Cette architecture est une composante indissociable du paysage pittoresque de plusieurs villes historiques dans le monde qui représente 95% de l'environnement bâti jusqu'à l'ère industrielle, d'où la nécessité de lui allouer une attention particulière.

La configuration de la Casbah d'Alger est caractérisée par un tissu urbain organique marqué par des ruelles sinueuses arborescentes et hiérarchisées ainsi que de nombreuses impasses. L'ensemble est implanté sur un site pentu dont la dénivelée est estimée à 118m, ceci d'une part.

D'autre part, le centre historique d'Alger a connu de multiples événements depuis sa fondation sur des ruines romaines jusqu'aux temps contemporains tantôt d'ordre politique et anthropique (guerre, bataille, exode rural, surpeuplement des maisons) et tantôt d'ordre naturel tel que les tremblements de terre. En effet, le séisme de 1716, une date marquante relatée par divers chercheurs et auteurs, fût dévastateur engendrant un effondrement quasi-général de la ville. Ali Chaouch, gouverneur d'Alger à cette époque, ordonna la reconstruction de la ville (la Casbah actuelle) en introduisant de nouvelles techniques constructives préventives aux maisons pour faire face aux tremblements de terre. C'est de là précisément qu'émane la problématique générale de la thèse. Divers questionnements surgissent dès lors dont le principal est relatif au degré d'efficacité réel de ces techniques préventives.

Un travail scientifique rigoureux mené sur les maisons de la Casbah d'Alger doit impérativement prendre en compte le contexte urbain environnant puisque ces dernières sont entrelacées et interconnectées sous forme d'agréats. La configuration de la Casbah d'Alger en macrostructures est l'une des techniques constructives parmi tant d'autres employée à l'échelle urbaine. Un agrégat représentatif est donc sélectionné selon une démarche illustrée un peu plus tard dans la thèse.

L'objectif principal de cette recherche ne se limite pas uniquement à l'aspect historiographique en levant le voile sur le caractère « parasismique » des maisons de la Casbah d'Alger, mais elle vise aussi à déceler la relation structurelle intrinsèque entre l'unité d'habitation et l'agréat, à documenter les matériaux de construction historiques employés et finalement à la réduction de la vulnérabilité sismique des bâtisses à travers une mise à niveau structurelle en concordance avec les chartes internationales de restauration.

L'atteinte de ces objectifs ne peut être réalisée sans la mise en place d'un protocole méthodologique spécifique s'inscrivant dans une démarche scientifique déductive.

Ce travail de recherche contribue à l'élaboration d'un workflow méthodique pour la réhabilitation structurelle des architectures vernaculaires ayant une configuration urbaine similaire à celle de la Casbah d'Alger organisée sous forme de macrostructures, et ce depuis l'acquisition des données in-situ jusqu'aux propositions d'intervention structurelle.

C'est une recherche pluridisciplinaire qui fait appel à différentes compétences (la lasergrammétrie 3D, l'analyse urbaine, la modélisation 3D basée sur le HBIM, la caractérisation mécanique des matériaux historiques, les analyses sismiques par Eléments Finis, la réglementation en vigueur relative aux opérations de réhabilitation/restauration, la mise à niveau structurelle des sites historiques) et à l'usage de multiples outils (le laser scanner 3D, les logiciels de modélisations 3D basés sur le BIM et les NURBS, les normes et les outils techniques de caractérisation mécanique, les logiciels de simulation structurelle) qui seront mis en symbiose afin d'atteindre un seul et unique objectif à savoir celui d'assurer la pérennité du site historique sous menace sismique constante à travers des opérations d'intervention préventives.

Cependant, la méthodologie générale de la recherche est organisée selon la méthode déductive en trois principales parties : l'observation (acquisition des données), l'expérimentation (exploitation des données), la conclusion (interprétation des résultats).

Tout d'abord, un chapitre introductif est dédié à la revue de littérature permettant de mettre en exergue les sources bibliographiques et les travaux de recherche les plus pertinents ayant contribué à la formulation du sujet ainsi que la méthodologie générale de recherche.

La première partie, l'observation, inclut dans le second chapitre le travail de terrain depuis la sélection d'un agrégat représentatif en se basant sur des critères issus principalement des résultats de l'analyse urbaine, l'application de la lasergrammétrie, le relevé photographique 3D, le relevé de l'état de conservation et enfin le prélèvement d'échantillons nécessaires pour la caractérisation mécanique des matériaux de construction historiques.

La deuxième partie, l'expérimentation, englobe trois chapitres. Un premier chapitre est dédié à la modélisation architecturale en se basant sur une série de logiciels basés sur le BIM et les NURBS. Le processus de modélisation permet le passage du nuage de point obtenu par la lasergrammétrie à un modèle numérique HBIM avec un haut degré de précision. Ce dernier est exploité dans diverses analyses dont l'Analyse par Eléments Finis FEA développée plus tard. Un second chapitre est consacré à la caractérisation mécanique des matériaux de construction historiques des maisons de la Casbah d'Alger en se basant sur une série de techniques spécifiques ainsi que les standards en vigueur. Les résultats obtenus permettent tout d'abord d'enrichir davantage la base de données relative aux propriétés des matériaux de construction du centre historique, mais aussi de constituer une référence importante lors du paramétrage du modèle numérique lors de la FEA. Un troisième chapitre est réservé à l'analyse structurelle de l'agrégat à l'état statique et sismique à différentes échelles.

La troisième partie, la conclusion, est vouée tout d'abord à une synthèse et une rétrospective sur les chartes de restauration afin d'en résumer les principales recommandations à prendre en considération lors de la sélection des propositions de réhabilitation structurelle. Une série de techniques sont proposées par la suite en se référant aux recommandations des chartes de restaurations ainsi qu'à celles issues de l'interprétation des résultats des différentes analyses structurelles.

S'agissant d'un site urbain historique classé, différents défis et difficultés ont été rencontrés à chaque étape de la recherche, on démontrera au fur et à mesure les solutions et alternatives entreprises ainsi la réadaptation des techniques au contexte de la recherche.

L'organisation et la rédaction de la thèse adoptent une approche très systématique. Ceci est important car de nombreux sujets multidisciplinaires sont développés où il est impératif de les faire véhiculer pour atteindre l'objectif de la thèse et faciliter la lecture et la compréhension de son contenu. Chaque chapitre est consacré à un domaine de recherche précis constituant un maillon indissociable d'une logique globale. Il est précédé par une introduction présentant brièvement son contenu, la méthodologie adaptée, les résultats obtenus et enfin une conclusion partielle qui le met en relation avec le chapitre suivant. Les représentations graphiques (dessins, croquis, schémas, organigrammes...) sont amplement présentes dans la thèse afin d'illustrer la méthodologie entreprise, synthétiser l'information et faciliter davantage l'analyse et l'interprétation des résultats. La norme typographique « GOST tri par nom » disponible dans le programme de traitement de texte Microsoft Word est utilisée tout le long de la thèse pour citer les références bibliographiques.

La thèse est achevée par une conclusion générale qui résume tous les résultats obtenus de la recherche, la réponse à la problématique générale, les difficultés et les limites de la recherche ainsi que les recommandations futures.

Chapitre 1 :

Revue de littérature

1.1 Projet de thèse

1.1.1 Introduction

Sur d'anciennes ruines phéniciennes et romaines, la Casbah d'Alger s'est remarquablement installée sur un site dont les caractéristiques paysagères, naturelles et topographiques demeurent exceptionnelles. Surplombant la mer Méditerranée et le golf d'Alger, l'ancienne médina est le témoignage d'une parfaite coexistence entre un tissu urbain organique et une situation judicieuse sur un site fortement pentu chargé d'histoire. Elle fut classée « patrimoine mondial » de l'humanité par l'UNESCO en 1992 (UNESCO).

Cet ensemble vivant datant du XVI^e siècle (CDWA) regroupe de précieuses bâtisses sous forme d'habitations, de « hammams » (bains), de mosquées, de « *Foundouks* » (hôtel de ville), de fontaines, de palais et autres. La ville d'Alger a connu plusieurs tragédies dévastatrices tantôt d'ordre politique (guerres, batailles...) et tantôt d'ordre naturel, tel que le tremblement de terre de 1716 (Abdessamed Foufa, 2007). Ce dernier a provoqué la quasi-destruction de la Casbah dont des mesures empiriques préventives ont été entreprises immédiatement lors de la reconstruction de la médina. Ces dispositifs affectent aussi bien l'échelle architecturale qu'urbaine. La Casbah d'Alger est composée de plusieurs entités appelées agrégats ou macrostructures, chaque agrégat est constitué de plusieurs unités (sous forme d'habitations ou autres) imbriquées et entrelacées formant ainsi un ensemble urbain, architectural et structurel irrégulier d'une cohérence invraisemblable.

Basée sur des sources historiques, la configuration de la macrostructure de la Casbah d'Alger confère une plus grande résistance et stabilité au site. Cette hypothèse nécessite jusqu'à présent des démonstrations scientifiques plus élaborées. La structure urbaine de la Casbah d'Alger sous forme d'agrégats, est répandue dans de nombreuses villes médiévales méditerranéennes comme à Salerne (Italie), à Fès (Maroc), à Tunis (Tunisie), à Coimbra (Portugal) et bien d'autres (Fig 1.1.1).

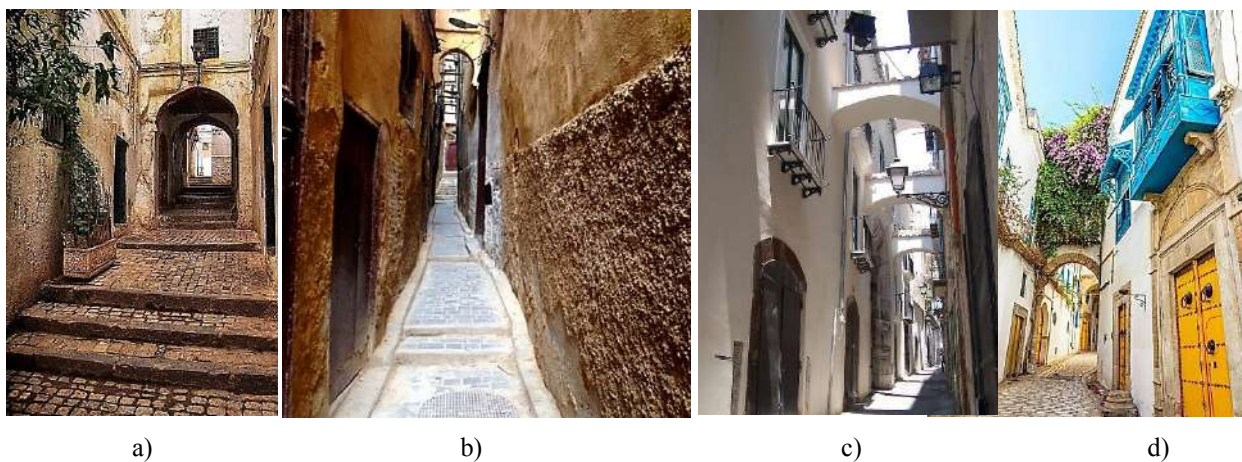


Fig 1.1.1 Ruelles historiques de quelques villes méditerranéennes

- a) Casbah d'Alger (Algérie) (Source : <https://www.pinterest.com/hbyba/algerie/?autologin=true>)
- b) Fès (Maroc) (source: https://www.lejournalinternational.fr/Au-coeur-de-Fes-connaitre-la-medina_a3044.html)
- c) Salerno (Italie) (source: https://it.wikipedia.org/wiki/Centro_storico_di_Salerno)
- d) Tunis (Tunisie) (source: <https://www.pinterest.com/pin/849773023421196691/>)

Les macrostructures représentent un dispositif empirique parmi de nombreux autres utilisés à l'échelle urbaine comme les *Sabats*¹ et les arcs de décharge² (**Fig 1.1.2**). En se référant aux différents textes historiques et au déchiffrement des archives ottomanes préalablement établis par les chercheurs, ces dispositifs empiriques permettent de garantir une meilleure stabilité de l'agrégat et réduisent par conséquent sa vulnérabilité face aux forces horizontales principalement générées par le phénomène sismique.



a)

b)

c)

Fig 1.1.2 Dispositifs traditionnels empiriques employés à l'échelle urbaine

a) *Sabat* couvrant une ruelle entière "Bastion 23".

(Source : <https://www.flickr.com/photos/144330620@N04/31913613750/in/photostream/>)

b) *Sabat* de petite dimension (Source : auteur)

c) Arc de décharge présent entre deux agrégats (Source : <https://mariecharrel.fr/2015/12/18/algerie-mon-amour/>)

En revanche, plusieurs dispositifs empiriques ont également été employés à l'échelle architecturale après le séisme de 1716 (Foufa, et al., 2008). Ces dispositifs ont été entrepris à la suite des instructions du Dey (Gouverneur) "Ali Chaouch" qui sont relatives aux mesures préventives de construction. En effet, des éléments en bois de *Thuja* ont été insérés à de nombreux endroits de la structure de maisons: 1) entre les colonnes porteuses et l'imposte d'arcs entourant le patio (**Fig 1.1.3 a**), 2) entre les arcs composant les galeries comme système de chaînage (tirants) (**Fig 1.1.3 b**) et 3) au sein des murs porteurs à différentes hauteurs. De plus, nous citons le croisement des arcades aux angles (**Fig 1.1.3 c**) et bien d'autres. Tous les dispositifs sont répertoriés et classés dans la thèse d'Amina Foufa Abdessamed, intitulée « *Contribution à la découverte des techniques constructives traditionnelles sismo-résistantes adoptées dans les grandes villes du Maghreb (Alger, Fès et Tunis) au XVIIIe siècle* » (Abdessamed Foufa, 2007).

La détermination des différentes causes des dommages structurels reste primordiale et doit précéder toute intervention sur les bâtiments historiques (restauration, réhabilitation, reconversion architecturale ...).

¹ Extension des espaces architecturaux intérieurs sur les ruelles extérieures.

² Arc en maçonnerie permettant la connexion structurelle des macrostructures entre elles.

En effet, cette étape permettra de mieux comprendre les anomalies structurelles et de proposer conséquemment une intervention structurelle plus adaptée.

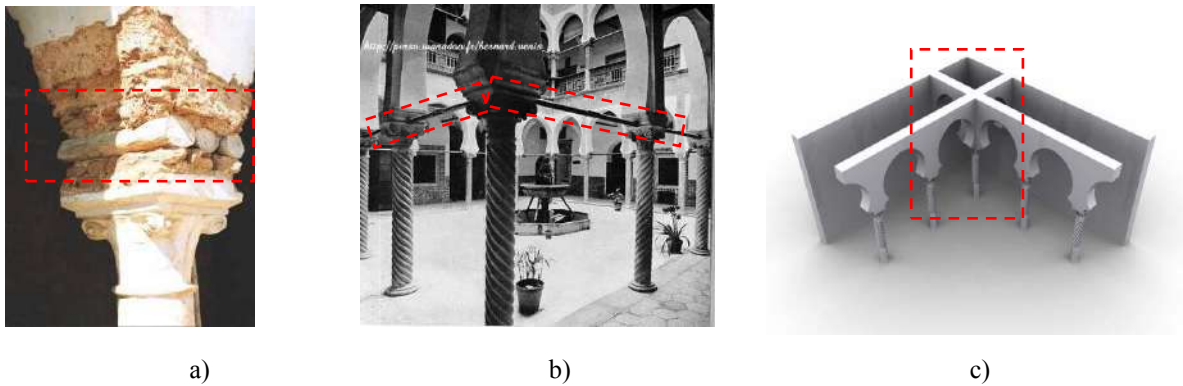


Fig 1.1.3 Dispositifs architecturaux empiriques et traditionnels

a) Détail de l'imposte d'un arc (Source : (Abdessamed Foufa, 2007))

b) Chainage en bois (tirant) utilisé entre les arcades (Source : http://alger-roi.fr/Alger/bibliotheque_nationale/textes/1_biblio_algeria31.htm)

c) Croisement des arcades aux angles (Source : (Abdessamed Foufa, 2007))

Dans la médina d'Alger, le phénomène d'effondrement accidentel et de démolition d'habitations s'accroît et a atteint une dimension effrayante : *"30% sont dans un état de dégradation très avancé, 50% sont en état de dégradation moyenne ou superficielle, 10% sont en ruine et 10% sont fermés"* (Himeur, 2012). Malgré les différentes tentatives initiées par l'Atelier Casbah³ à la fin des années 1970, l'exécution des travaux de restauration et de réhabilitation reste délicate. En effet, les principales difficultés rencontrées par les spécialistes (architectes, restaurateurs et ingénieurs) lors des interventions de restauration sont, mais pas seulement : 1) l'organicité du tissu urbain, 2) la complexité des typologies architecturales et des systèmes constructifs des maisons et 3) la multiplicité des pathologies et les facteurs de dégradation (endogènes et exogènes) (Fig 1.1.4).

De plus, le système constructif est dépourvu de renforcements sachant que les matériaux de construction utilisés dans la construction des maisons sont élémentaires. *« La prévalence de matériaux pauvres dans la construction de la Casbah représente un réel handicap par rapport à sa conservation. [...] En Algérie, comme dans tous les pays de la Méditerranée, la suprématie des techniques et des matériaux modernes dans le chantier a interrompu le processus d'un entretien continu, permettant aux centres historiques de conserver leur apparence et de «se transformer en se préservant» (Giovanetti, 1992).*

Les facteurs de dommages structurels affectant les maisons de la Casbah d'Alger ainsi que les sources de pathologies sont divers et peuvent être classés en trois catégories, à savoir:

³ Organisation composée d'architectes et de spécialistes du patrimoine architectural mis en place pour étudier, analyser et suivre les différentes actions de sauvegarde entreprises dans la Casbah d'Alger.

1. Facteurs naturels : (séisme, composition du sous-sol, morphologie du site ...);
2. Facteurs structurels (vieillesse des matériaux, manque de contreventement et de chaînage, hétérogénéité des matériaux de construction...);
3. Facteurs anthropiques (mode de vie, surpeuplement des maisons, modifications architecturales et structurelles ...).

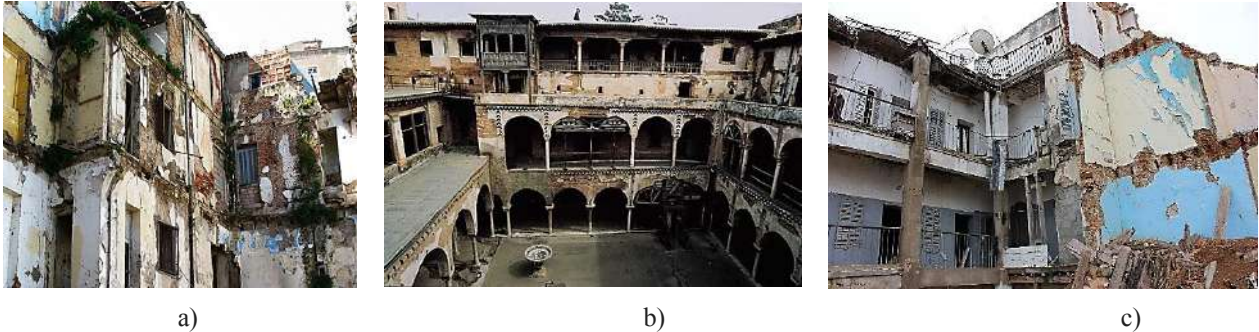


Fig 1.1.4 Quelques exemples de dommages structurels et d'effondrement partiel des maisons

- a) Impact de l'humidité sur la structure et présence de modifications structurelles inadéquates
(Source: <http://www.lesechosdalger.com/rehabilitation-de-casbah-dalger-lalgerie-a-perdu-temps-moyens-importants/>)
- b) Palais du Bey, présence de fissures et dommages superficiels.
(Source: <https://www.liberte-algerie.com/centre/des-effondrements-en-serie-269146>)
- c) Effondrement partiel d'une maison (source: auteur).

Face à toutes ces données historiques et in situ, nous constatons que la Casbah d'Alger est soumise à de multiples facteurs d'altération endogènes et exogènes qui peuvent nuire à son intégrité et son authenticité et menacer par conséquent sa pérennité. Nonobstant les différentes recherches menées sur la Casbah d'Alger au cours des quatre dernières décennies, il convient de préciser l'insuffisance de démonstrations techniques basées sur des approches scientifiques mettant en évidence l'impact des facteurs d'altération sur la vulnérabilité des maisons de la Kasbah d'Alger.

L'étude de tous ces facteurs nécessite un énorme investissement personnel et matériel. Cependant, les travaux de recherche actuels se concentrent principalement sur :

1. Le séisme comme facteur exogène : l'aléa sismique d'Alger est important, il repose sur six failles qui affectent au premier degré son centre historique et ses sites patrimoniaux (Boughazi, et al., 2014).
2. Les matériaux de construction qui constituent les maisons de la Casbah d'Alger représentent un des facteurs endogènes. En effet, le manque de connaissances relatives aux propriétés mécaniques et physico-chimiques des matériaux de construction affecte fortement les travaux de maintenance et l'adéquation des interventions structurelles. *"La question des matériaux a été soulignée opportunément lors de l'analyse menée par l'UNESCO et l'Atelier Casbah" mais, au-delà de l'énoncé du problème, aucun résultat pratique et remarquable n'a été obtenu "* (Giovanetti, 1992).

De plus, les deux facteurs retenus sont extrêmement associés car les matériaux de construction ainsi que la typologie constructive affectent la vulnérabilité des maisons de la Casbah d'Alger lors de l'avènement d'un séisme.

Les imbrications structurelles et spatiales des maisons de la Casbah d'Alger au sein du même agrégat ainsi que l'absence de chevauchement entre les macrostructures les font agir en une unité structurelle unique. Cette particularité propre aux cités médiévales et particulièrement à la Casbah d'Alger incite les chercheurs à considérer le cadre bâti environnant.

Travailler sur les maisons de la Casbah d'Alger signifie donc l'implication non pas d'une maison solitaire mais de tout l'agrégat auquel elle appartient. Cela permettrait de mieux simuler l'impact des facteurs d'altération sur les maisons ainsi que l'interaction entre les différentes unités composant la macrostructure.

Face à toutes ces données historiques et in situ, il est important de mettre en évidence deux aspects fondamentaux qui sont développés dans cette thèse, à savoir :

1. La vulnérabilité sismique de l'ancienne médina faisant référence aux sources historiques ;
2. Une documentation insuffisante et incomplète relative à la caractérisation des matériaux de construction historiques des maisons de la Casbah d'Alger.

1.1.2 Problématique générale

A travers une approche expérimentale, les dispositifs empiriques sismo-résistants participent-ils au contreventement des maisons de la Casbah tel que stipulé dans les textes historiques ?

Quel est le comportement structurel d'un agrégat dans l'état statique et sismique ? Et comment peut-on réduire la vulnérabilité sismique de l'agrégat à travers une intervention structurelle adéquate ?

Quelles sont les caractéristiques mécaniques des matériaux de construction des maisons de la Casbah d'Alger ?

1.1.3 Principaux objectifs de la recherche

Les principaux objectifs de la recherche sont :

1. Confirmer ou infirmer l'hypothèse relative à la construction parasismique des maisons de la Casbah d'Alger par le biais d'une Analyse par Eléments Finis FEA.
2. Réduire la vulnérabilité sismique des maisons à travers une réhabilitation structurelle adaptée respectant les chartes de restauration.
3. Contribuer à la caractérisation des matériaux de construction des maisons de la Casbah d'Alger à travers des tests mécaniques destructifs et non destructifs.

1.1.4 Nouveauté et intérêt de la recherche

Le travail de recherche élaboré dans le cadre de cette thèse consiste à proposer un processus de réhabilitation structurelle d'une architecture vernaculaire exceptionnelle de valeur universelle. Ce procédé est appliqué à un agrégat entier regroupant plusieurs unités d'habitation de typologies architecturales diverses. Il est important de préciser que les recherches similaires appliquées à l'échelle des macrostructures sont très limitées, dont le comportement structurel mérite d'être exploré.

Il convient de souligner qu'à chaque étape du processus méthodologique, l'intervention sur une architecture vernaculaire historique nécessite des techniques bien spécifiques et précises dont l'application des outils et des normes actuelles ne s'y adapte pas nécessairement. Cependant, des solutions et des alternatives sont proposées et appliquées au cas d'étude sélectionné.

L'intérêt général de cette recherche repose sur trois aspects principaux :

a- Un apport d'ordre méthodologique

Le processus méthodologique servira de guide pour les recherches futures sur des architectures vernaculaires ou sur celles représentant une organisation urbaine similaire sous forme d'agréats, et ceci dans le cadre d'une réhabilitation structurelle.

b- Un apport d'ordre historiographique

Cette recherche permettra, d'une part, de lever le voile et d'éclairer davantage certaines hypothèses historiques, notamment celles relatives à la résistance sismique des maisons de la Casbah d'Alger.

D'autre part, elle permettra de documenter davantage les matériaux de construction des maisons de la Casbah d'Alger.

c- Un apport d'ordre pratique

Cette recherche permettra d'interpréter le comportement structurel général d'un agrégat, de comprendre la corrélation entre l'unité et la macrostructure ainsi que de prioriser et d'hierarchiser les interventions structurelles lors des projets de réhabilitation.

1.1.5 Processus méthodologique

La présente recherche s'inscrit dans une démarche scientifique déductive. Comme le montre la (**Fig 1.1.5**), le processus méthodologique est composé de 5 étapes principales, à savoir :

- La première est l'investigation in-situ en sélectionnant un cas d'étude représentatif et en réalisant le relevé architectural.
- La deuxième étape est la création du modèle HBIM à partir du nuage de points et à l'aide d'un ensemble de logiciels fondés sur les NURBS et BIM
- La troisième étape est la caractérisation mécanique des matériaux de construction par voie destructive et non destructive.
- La quatrième étape est la FEA de l'agréat à l'état statique et sismique sur la base du modèle HBIM et ainsi que les tests du laboratoire.

- La cinquième et dernière étape est la proposition d'intervention structurelle faisant référence aux résultats de la FEA et aux chartes de restauration

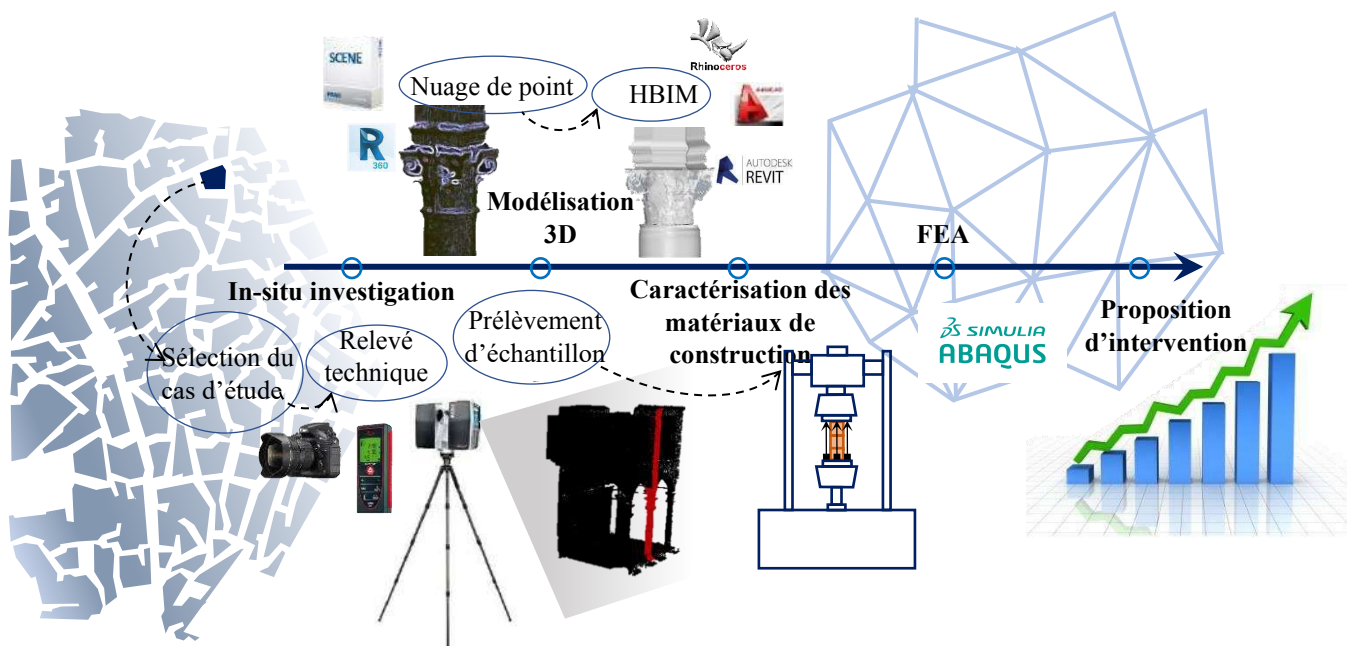


Fig 1.1.5 Schéma du processus méthodologique (Source : auteur)

1.1.6 Mots clefs

Architecture Vernaculaire – Casbah d’Alger – Agrégat – Laser scanner 3D – HBIM – NURBS- Tests mécaniques destructifs – Tests mécaniques non destructifs - FEA – Réhabilitation structurelle.

1.2 Revue de littérature

1.2.1 Introduction

Un demi-siècle s'est écoulé depuis le lancement du projet de restauration et de réhabilitation du centre historique d'Alger, débuté durant les années 70 et sa concrétisation demeure complexe et ambiguë suite à plusieurs facteurs de diverses natures. Les travaux de chercheurs sur la Casbah d'Alger sont nombreux, multiples et variés, ceci est dû à la complexité morphologique, architecturale et structurelle de la Médina.

"La vieille ville d'Alger "appelée Casbah" est le témoignage de la forme urbaine et une civilisation qui a réuni plusieurs tendances méditerranéennes dans un ensemble complexe et original par le parti et l'agencement des maisons qui s'adaptent avec une remarquable souplesse au site" personnalisant chaque espace avec pourtant une grande homogénéité" (Doulcier, et al., 1973).

La Casbah d'Alger, une ville labyrinthique dont l'organicité est confondue avec l'harmonie, représente un témoignage tangible et palpable d'une stratification civilisationnelle remarquable depuis sa fondation sur des ruines romaines jusqu'à son développement en tant qu'ensemble urbain et humain exceptionnel.

Cette spécificité a suscité la curiosité des chercheurs et auteurs, dans de nombreux domaines. Nous citons à titre d'exemple certaines recherches liées à la sociologie ou à l'anthropologie (les traditions, les coutumes et mœurs, le mode de vie des habitants ...), à l'ornementation (la décoration intérieure, le langage ornemental ...), à l'hydrographie (le drainage des eaux pluviales, système d'évacuation des eaux usées ...), l'urbanisme (la hiérarchie des structures, l'étude des routes urbaines ...), à l'architecture (l'organisation spatiale, la logique fonctionnelle ...) et autres.

Cependant, il convient de mentionner en amont l'exorbitance des recherches sur le centre historique, nous orientons principalement la revue de la littérature sur les aspects structurels des maisons de la Casbah d'Alger, à savoir : la description du système structurel, les sources de nuisance endogènes et exogènes, la caractérisation des matériaux de construction historiques et la vulnérabilité des maisons (Fig 1.2.1).

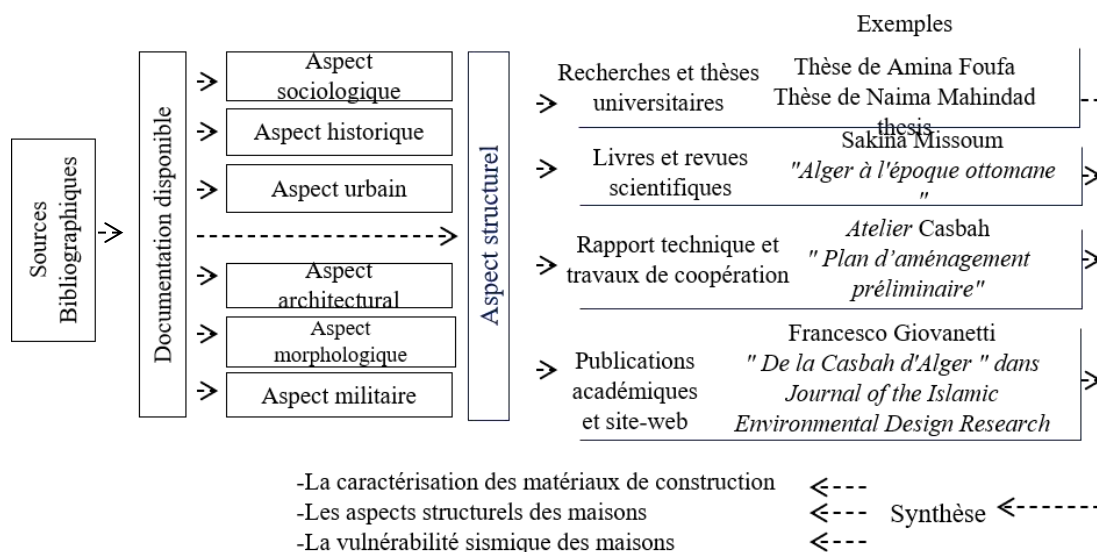


Fig 1.2.1 Organigramme représentant la classification des sources bibliographiques (Source : auteur).

En se basant sur des références algériennes et étrangères, la revue de la littérature est présentée en deux étapes comprenant les recherches les plus pertinentes relatives :

1. A la formulation de sujet de recherche ainsi que la problématique générale :
2. Au processus méthodologique général.

1.2.2 Thématique de recherche et problématique générale

Nous entamons le parcours bibliographique avec les ouvrages et travaux établis par l'Atelier Casbah dans les années 70. Ces travaux consistaient à mettre en œuvre un projet de restauration et de réhabilitation le plus complet possible en impliquant une équipe multidisciplinaire de chercheurs et de professionnels et en traitant les différentes composantes du centre historique. Le travail de l'Atelier Casbah a englobé l'ensemble du processus de restauration dans ses différentes phases génériques comme le montre la figure ci-dessous (Fig 1.2.2).

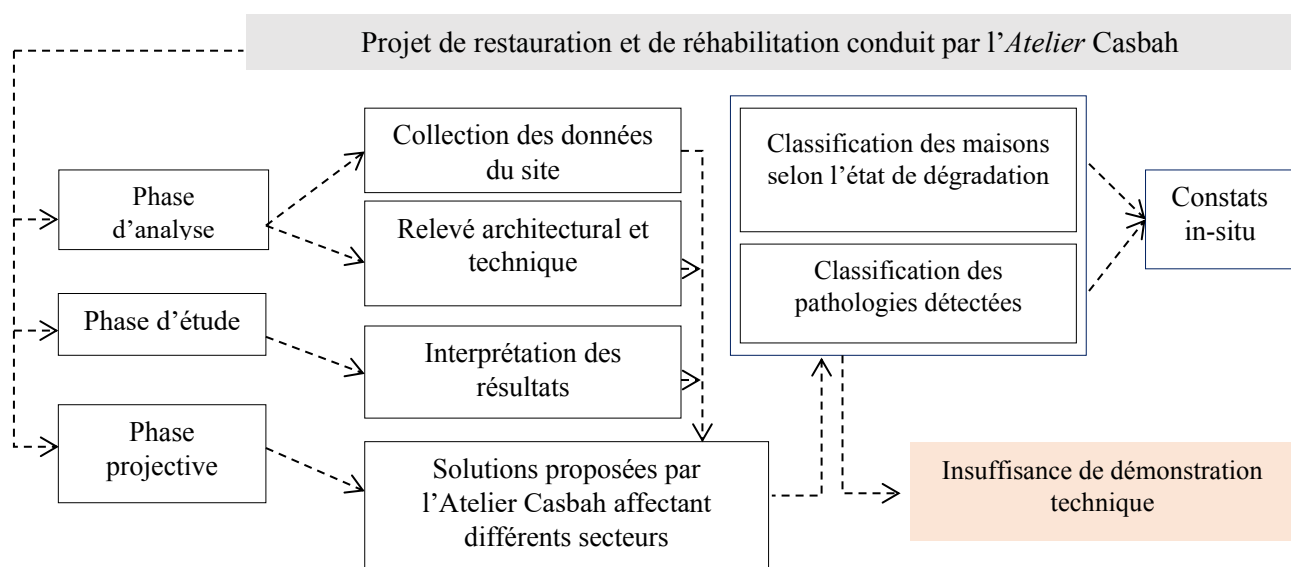


Fig 1.2.2 Organisation sur le contenu général du projet de réhabilitation et de restauration initié par l'Atelier Casbah (Source : auteur).

Tous les résultats et propositions ont été résumés dans le livre « *Plan d'aménagement préliminaire : Projet de revalorisation de la Casbah d'Alger* » (Atelier Casbah, 1981). Cet ouvrage comprend dans ses parties réservées aux aspects structurels des détails non exhaustifs sur le système constructif des maisons de la Casbah d'Alger (fondations, murs en maçonnerie, planchers et colonnes ...). Le plan d'action et les solutions envisagées par l'Atelier Casbah ont été précédés par la mise en place d'une grille classificatrice de l'état de conservation des maisons, suivie de la catégorisation des pathologies détectées in situ. Il convient de noter l'insuffisance ou le manque de démonstrations techniques et scientifiques sur les sources de nuisances et d'anomalies structurelles alternant le centre historique. En effet, des études au laboratoire technique n'ont pas été établies pour la caractérisation mécanique des matériaux de construction (pierres, briques, mortiers...). En revanche, aucune démonstration n'est perçue sur le comportement structurel des maisons sous les forces horizontales générées principalement par les tremblements de terre.

Une connaissance large et approfondie des sources de nuisance et de leurs effets sur le système structurel d'un bâtiment historique est une phase essentielle et décisive d'un véritable projet de restauration et / ou de réhabilitation. Cette recommandation a été soutenue par l'Atelier Casbah pour les recherches subséquentes.

Il est à noter que de la période d'après-guerre (1962) jusqu'aux années 2000, l'attention des autorités publiques s'est principalement portée sur les monuments historiques singuliers. Les projets de restauration et / ou de réhabilitation ont principalement touché les édifices culturels et religieux tels que les mosquées, les mausolées, les églises et les palais. Cela dit, les interventions de restauration sur les sites urbains historiques tels que les Médinas, les Casbahs et les *Ksours*⁴, s'avèrent restreintes et limitées. Dans le livre intitulé « *Stratégie pour un Développement durable local: Renouvellement urbain et processus de transformations informelles* », Abdelouahab Zekagh⁵ a mis en exergue dans le quatrième chapitre un bilan des études établies pour la Casbah depuis l'indépendance jusqu'au début du 21^e siècle. Le bilan est résumé dans le **Tab 1.2.1**

Actions	Dates	Details
Création de la Sous-direction des musées et monuments historiques	1965-1966	Etablissement de la première évaluation de la situation de la Casbah d'Alger transmise à l'UNESCO en 1965.
Création de l' <i>Atelier</i> Casbah	1968	Support pour réhabilitation et la sauvegarde de la Casbah d'Alger
Mise en œuvre du COMEDOR : Comité d'étude sur le développement et l'organisation de l'agglomération d'Alger.	1972	Établissement d'une étude démographique détaillée
Création du POG Alger : le Plan d'Organisation Général	1975	Projet faisant de la médina d'Alger un pôle structurant
Constitution d'une délégation d'experts	1978	Mise en place d'un projet d'étude et réalisation pour la Casbah
Création de PDAU : Plan Directeur d'Aménagement et Urbanisme	1995	Proposition de la Casbah comme site historique, culturel et touristique
Gestion de projet de l'agréat « <i>Lalahoum</i> »	1999	Projet de construction d'un jardin archéologique à l'agréat de <i>Lalahoum</i> avec une restitution des rues originelles.
Etude du plan permanent de sauvegarde et d'aménagement de la Casbah d'Alger	1999-2002	Gestion des outils et protection du patrimoine culturel bâti et urbain, dans le but de préserver les valeurs historiques.

Tab 1.2.1 Résumé des actions menées à la Casbah 1962-2005 (Source : (Atkinson, et al., 2008))

⁴ Des villages fortifiés traditionnels du Sahara et de la chaîne de l'Atlas saharien, situés le long des anciennes routes commerciales transsahariennes, ils ont subi récemment un processus de restauration et de réhabilitation à grande échelle.

⁵ Directeur Général de l'Office de la gestion et de l'exploitation des biens culturels protégés de l'Office de Gestion et d'Exploitation des Biens Culturels protégés (OGBC).

Les actions de réhabilitation entreprises au cours de cette période sont générales et n'abordent pas les aspects liés aux détails de construction, aux techniques de restauration et à la caractérisation des matériaux de construction.

Nous poursuivons la recherche bibliographique par la thèse de doctorat établie par Amina Foufa intitulée *"Contribution à la découverte des techniques constructives traditionnelles sismo-résistantes dans les grandes villes du Maghreb (Alger, Fès et Tunis) durant le XVIIIe siècle"* (Abdessamed Foufa, 2007) qui représente une référence de départ significative.

En effet, cette recherche nous est d'un grand intérêt puisqu'elle fournit les informations relatives aux différentes techniques de construction empiriques « sismo-résistantes » employées à la Casbah d'Alger. Les sites historiques nord-africains en général (le Maghreb) et ceux du nord de l'Algérie en particulier, sont constamment menacés par les tremblements de terre en raison de leur emplacement critique entre les deux plaques tectoniques afro-européennes. Cette bande instable est connue pour sa forte activité sismique et volcanique. Nonobstant les diverses tragédies sismiques survenues durant les trois derniers siècles, les villes historiques maghrébines dont les Casbahs d'Afrique du Nord, ont pu survivre. Cette persistance ne peut exister sans la prise en considération de l'aléa sismique lors de l'édification de ces villes : telle est la principale hypothèse avancée par A.Foufa dans ses travaux de recherche.

En réponse à cette hypothèse, l'auteur a procédé par une classification des différents dispositifs empiriques selon la composition structurale des maisons de la Casbah, en d'autres termes : les fondations, la superstructure flexible et la superstructure rigide. Cette classification concernait aussi bien l'échelle urbaine qu'architecturale. Il est utile et primordial de préciser l'approche méthodologique adoptée par A. Foufa afin de positionner et cerner notre recherche (Fig 1.2.3).

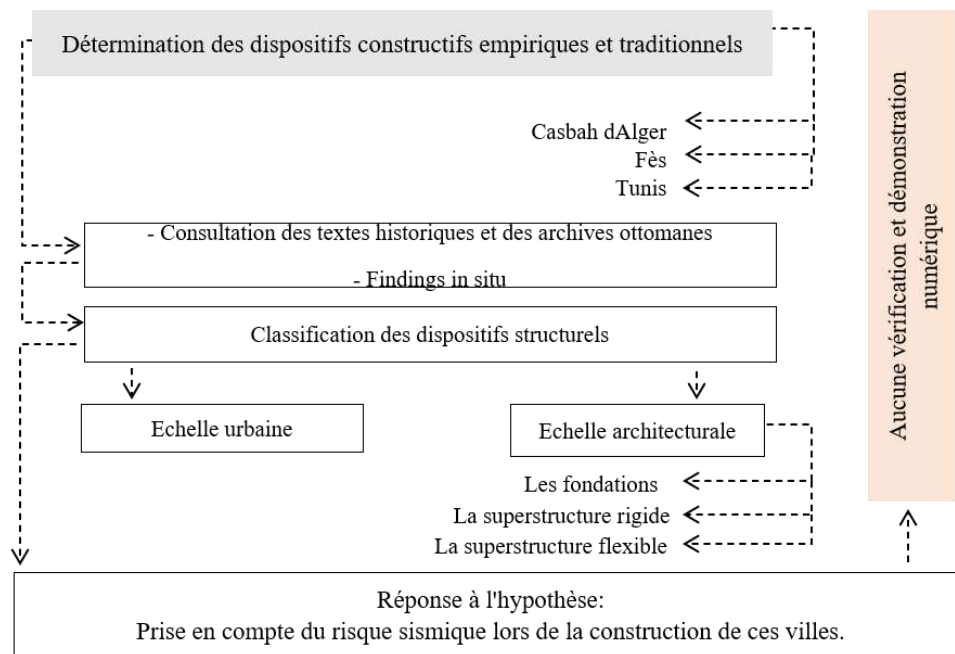


Fig 1.2.3 Résumé du processus méthodologique adopté par A.Foufa (Source : auteur)

L'énumération et la classification des techniques empiriques utilisées dans la construction des trois villes nord-africaines reposent sur trois phases importantes :

1. L'analyse des textes historiques liés à la construction des villes du XVIII^e siècle ;
2. La lecture des archives ottomanes ;
3. Une vérification in situ.

Ce dispositif méthodologique a permis la vérification et la confirmation de l'hypothèse évoquée ci-haut. Il convient de préciser l'absence de démonstrations numériques et scientifiques afin de vérifier l'efficacité de ces dispositifs autant sur le comportement structurel des maisons de la Casbah d'Alger que sur la réduction de leur vulnérabilité face aux facteurs endogènes et exogènes.

La nature des matériaux de construction historiques de la Casbah d'Alger a fait l'objet d'un nombre restreint et limité d'études. En fait, le rapport de Francesco Giovanetti⁶ en 1992, évoque la spécificité de la Casbah quant à son système de construction et les particularités des matériaux de construction qui la composent (**Fig 1.2.4**). La citation suivante est un extrait de ce rapport : *"Les matériaux employés pour la construction des ensembles urbains des maisons maghrébines sont élémentaires. La maçonnerie se bâtit soit en pisé (mélange de terre marneuse et débris), soit en briques. En élévation elle est pourvue de beaucoup de renforcements, liaisons et chaînages en longueur et en épaisseur - réalisés en bois ou en pierre de récupération- équilibrant le manque de soin qu'on observe dans l'appareil des rangées des briques et la faiblesse du mortier[...] La conception structurelle des bâtisses s'inspire à la légèreté, à l'élasticité, à la solidarité entre la maçonnerie et les planchers »* (Giovanetti, 1992).

L'une des caractéristiques remarquables du centre historique d'Alger, est la configuration structurelle basée sur l'utilisation de matériaux de base (chaux, briques, pierre, argile...). Ces derniers sont ingénieusement assemblés grâce aux techniques empiriques issues du savoir-faire des anciens maîtres artisans. Le chevauchement et l'entrelacement des maisons de la Casbah entre elles lui confèrent un aspect organique et une grande flexibilité structurelle. La rigidité et la ductilité d'un bâtiment dépendent principalement des matériaux de construction qui le composent. Cependant, il est nécessaire et important d'approfondir et d'élargir les connaissances relatives au comportement et à la caractérisation des matériaux de construction, ce qui représente une recommandation importante mentionnée par F. Giovanetti.

⁶ Directeur technique, professeur adjoint et Gestionnaire U.O. « Monuments de Rome : les fouilles, la restauration, la mise en valeur » de la Surintendance du patrimoine culturel –Rome, Italie.

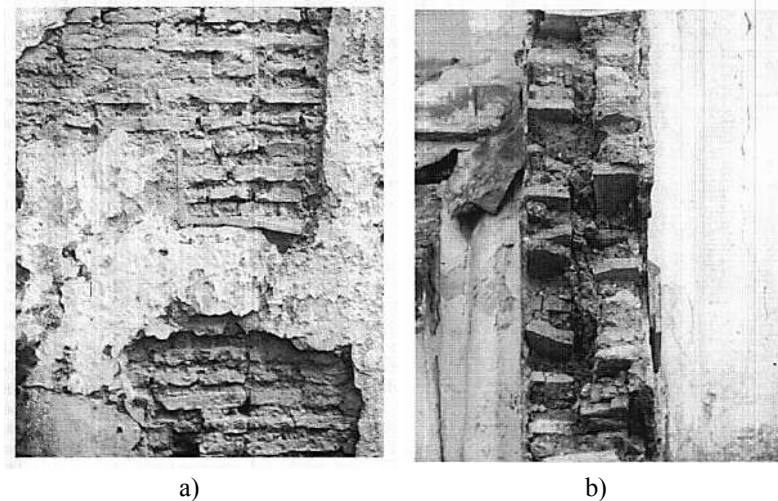


Fig 1.2.4 a) Murs de maçonnerie typiques des maisons de la Casbah (briques en terre cuite et mortier de chaux et d'argile),
b) Epaisseur typique des murs (Source: (Giovanetti, 1992))

La composition des briques en terre cuite et des mortiers historiques utilisés dans la construction des mosquées de la Casbah d'Alger a fait l'objet de la thèse de doctorat de Samia Chergui intitulée "*Construire, gérer et conserver les mosquées en al-Djaza'ir ottomane (XVIe – XIXe siècles)*" (Chergui, 2007). Grâce à l'utilisation de sources documentaires archivistiques inédites et sur la base d'une analyse philologique, S. Chergui a contribué à l'identification des matières premières, techniques et méthodes de fabrication des matériaux de construction (briques et mortiers) utilisés dans les bâtiments de l'époque ottomane à Alger.

Une connaissance large et approfondie des matériaux de construction historiques des monuments ou sites urbains classés ou protégés, permet d'assurer une meilleure préservation et intervention lors des différentes opérations de restauration. « *En Algérie, la préservation et la conservation du patrimoine architectural est une discipline relativement nouvelle qui confronte les professionnels à une problématique importante qui est la méconnaissance des matériaux et des techniques avec lesquels les bâtiments anciens ont été construits.* » (Mahindad, 2017)

Les caractéristiques physico-chimiques, minéralogiques et mécaniques des matériaux de construction historiques sont variables et dépendent de plusieurs paramètres ; nous citons à titre d'exemple : le procédé de fabrication et les techniques utilisées, la source d'extraction des matières premières, la zone géographique et la nature du sous-sol, l'assemblage et l'utilisation des matériaux. Cela permet d'attribuer aux matériaux de construction des caractéristiques spécifiques, d'où la nécessité d'étudier chaque matériau indépendamment. Dans cette optique, le travail mis en place par N.A. Mahindad apporte de nouvelles connaissances sur les matériaux de construction de plusieurs bâtiments patrimoniaux appartenant aux centres historiques d'Alger et de Béjaïa. L'étude s'est focalisée sur trois matériaux :

1. La brique en terre cuite,
2. Le mortier de jointoiement et
3. Le mortier de finition (enduit).

La **Fig 1.2.5** résume les étapes de caractérisation des trois matériaux. Une suggestion de la formule de préparation des joints de mortier utilisés dans les maisons de la Casbah d'Alger a été présentée dans la thèse en guise de conclusion. Deux aspects importants ressortent de la thèse de N.A. Mahindad :

1. La caractérisation mécanique des briques en terre cuite des maisons de la Casbah d'Alger est limitée, n'ayant présenté que la résistance à la compression et à la flexion uniaxiale. De plus, l'auteur n'a pas illustré le processus méthodologique appliqué aux matériaux historiques lors des essais, qui sont insuffisants en nombre.
2. Les résultats de la caractérisation physico-chimique des briques en terre cuite ainsi que du mortier de jointoiment des maisons de la Casbah d'Alger représentent une référence importante lors de la simulation structurale par Eléments Finis.

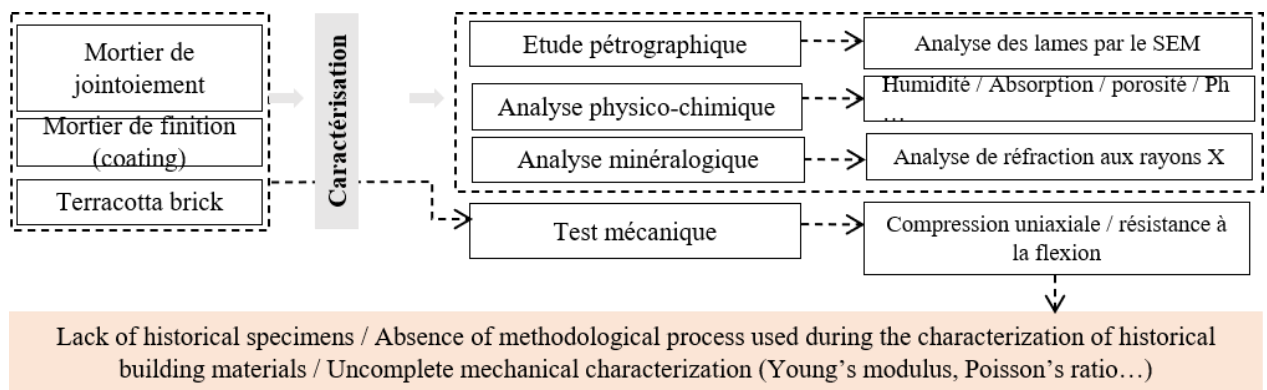


Fig 1.2.5 Synthèse de la caractérisation des matériaux de construction développée dans la thèse de N. Mahindad.
(Source : Auteur)

Le livre de Sakina Missoum, achevé en 2003 et intitulé « *Alger à l'époque ottomane, la médina et la maison traditionnelle* » (Missoum, 2003), fournit des connaissances génériques sur les matériaux de construction de la Casbah. En effet, dans le chapitre relatif à l'organisation structurelle des maisons de la Casbah d'Alger, deux points fondamentaux sont identifiés, à savoir :

1. La présentation d'un certain nombre de détails constructifs, tels que : la composition des murs porteurs, les galeries intérieures autour du patio "*Wast Ad-Dar*"⁷, les fondations et les sols ainsi que les matériaux de construction (brique, mortier...),
2. La vulnérabilité sismique de la Casbah d'Alger dans le temps et le caractère empirique des maisons.

Un exemple de la structure et de la composition d'un plancher typique appartenant aux maisons est illustré dans la **Fig 1.2.6**.

⁷ *Wast Ad-Dar*: patio ou espace central emblématique des maisons de la Casbah d'Alger.

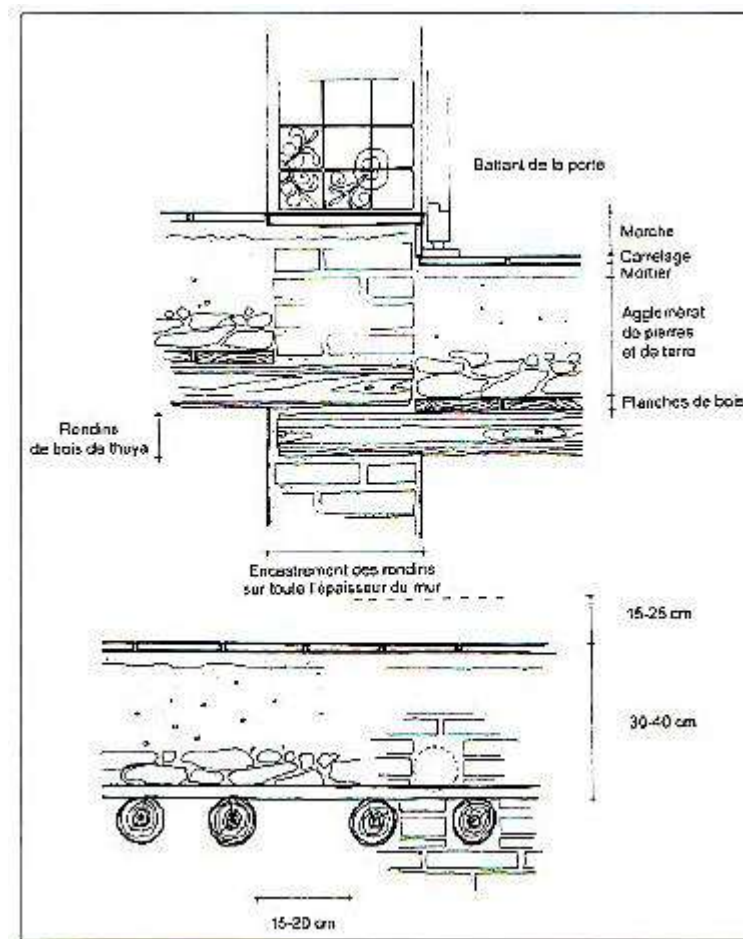


Fig 1.2.6 Composition du plancher (chambre, galerie) (Source : (Missoum, 2003)).

Le Docteur Shaw a expliqué lors de son séjour à Alger en 1720 et 1732 (Missoum, 2003), le procédé de préparation du mortier servant à la construction et le montage des murs porteurs en briques. *"Voici comment les Maures font leur ciment. Ils prennent deux parties de cendre de bois, trois de chaux et une de sable fin qu'ils passent au tamis ; après quoi ils mêlent intimement le tout ensemble, et battent ensuite ce mélange avec des maillets de bois pendant trois jours et trois nuits consécutifs en y jetant, alternativement et à des intervalles déterminés, de l'eau et de l'huile jusqu'à ce que le ciment ait acquis la consistance requise. Ils s'en servent principalement dans la construction de leurs voûtes, de leurs citernes et de leurs terrasses ; mais les conduits de leurs aqueducs sont lutés avec des étoupes battues, de la chaux et de l'huile, sans y mêler de l'eau. (Shaw, 1980)".* Au lieu de colle ordinaire, leurs menuisiers se servent souvent d'une composition faite avec du fromage (qrich) qu'ils pilent d'abord dans un mortier avec un peu d'eau, jusqu'à ce qu'ils en aient fait sortir tout le petit-lait, puis une seconde fois en y mêlant un peu de chaux fine, après quoi ils appliquent ce mélange, avec le plus de promptitude possible, aux planches qu'ils veulent joindre ensemble. On m'a assuré que cette espèce de colle est si tenace, que quand une fois elle est sèche, de l'eau même ne peut plus la détremper. (Shaw, 1980) "

Les passages ci-dessus démontrent la particularité et la spécificité des techniques de construction empiriques employées durant l'édification du centre historique d'Alger.

Parallèlement à cela, Sakina Missoum met en évidence les anciennes techniques utilisées dans les maisons de la médina à caractère « sismo-résistant ». Voici un passage évoquant l'une de ces techniques de construction : « *Les murs des maisons en ruine révèlent la présence de rondins de bois horizontaux noyés dans la maçonnerie qui, à différentes hauteurs et de manière discontinue, servent de nouvelle assise à la partie supérieure du mur et de résistance aux secousses sismiques.* (Missoum, 2003) Cette déclaration basée sur des observations visuelles rejoint conjointement le travail établi par A. Foufa.

L'auteur explique également une autre particularité en relation avec la configuration de l'espace architectural de la maison, cette fonctionnalité est un dispositif important pour contrecarrer l'aléa sismique, voici donc un extrait : « *Les maisons analysées montrent une distribution générale des chambres et des galeries autour du « Wast Ad-Dar » en forme d'hélice. La disposition de ces espaces, qui s'appuient les uns sur les autres en angle droit en suivant le mouvement de l'hélice, présente le très grand avantage de résister aux charges horizontales des secousses sismiques dont elle répartit l'énergie.* » (Missoum, 2003)

Face à toutes ces affirmations, il convient de souligner la convergence des informations liées à l'hypothèse « sismo-résistance » des maisons de la Casbah d'Alger. Cette caractéristique pourrait être dérivée par des techniques de construction empiriques et traditionnelles telles que présentées précédemment, d'où le besoin de démonstrations scientifiques.

En revanche, André Ravéreau nous informe dans son ouvrage intitulé « *la Casbah d'Alger, et le site créa la ville* » (Ravéreau, 1989) l'introduction d'un certain nombre d'éléments architecturaux spécifiques dans la conception des maisons de la Casbah d'Alger. Les traverses (chainage) font partie de ces éléments qui entrent dans la composition des arcades du patio (Fig 1.2.7). Contrairement à certaines affirmations de chercheurs, ces éléments jouent un rôle purement fonctionnel et n'interviennent pas dans la stabilité des galeries intérieures qui entourent le patio. « *C'est dans cet élément de construction que se trouve encastrée la tringle de bois ouvragé qui semble joindre les arceaux entre eux, mais qui n'est pas un tirant visant à consolider l'arcature, du fait même de son encastrement, d'ailleurs assez légère et souple. Elle supporte des voilages, des tentures, des objets suspendus comme les lampes.* » (Ravéreau, 1989)

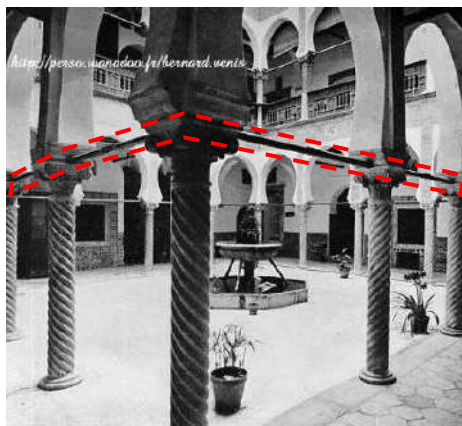


Fig 1.2.7 Insertion de chainage en bois dans la composition des arcades
(Source : http://alger-roi.fr/Alger/bibliotheque_nationale/textes/1_biblio_algeria31.htm)

André Ravéreau évoque également la notion de matériaux de construction des maisons de la Casbah ainsi que le système de contreventement. Ceci est matérialisé au moyen de certains dispositifs empiriques tels que l'extension et l'intersection des arcs aux quatre angles du *Wast Ad-Dar*. [...] *En effet, chaque arcature va se développer, non pas seulement jusqu'à celle qui vient à sa rencontre en angle droit, mais se prolonger jusqu'au mur, souvent bien plus épais et solide, qui forme la façade des appartements. Il existera donc, à chaque angle du west ed-dar, deux arcs supplémentaires sous galerie ou arcs de contreventement.* » (Ravéreau, 1989)

L'atténuation de l'impact du risque sismique sur les constructions ancestrales fut l'une des principales préoccupations qui intriguaient les maîtres maçons. Pendant des siècles, l'utilisation de techniques empiriques comme renforcement des constructions était présente, et ce au vu des menaces répétitives de ce phénomène naturel incontrôlable et imprévisible. Un certain nombre de travaux de recherche ont été menés sur les différentes tragédies sismiques qui ont frappé la région Algéroise. Cette dernière est basée sur six failles sismiques (Boughazi, et al., 2014). Alger est à haut risque sismique ; cela affecte principalement son centre historique et ses sites patrimoniaux. Un état sur les tremblements de terre survenus pendant la période arabo-berbère, coloniale et postcoloniale, a été dirigé par D. Benouar et A.Foufa dans sa thèse de doctorat. Les travaux comprenaient les événements sismiques de 1365 jusqu'au tremblement de terre du 21 mai 2003. Le tremblement de terre du 3 février 1716 fut le plus dévastateur dont l'intensité avoisina les IX degrés sur l'échelle de Richter (Foufa, et al., 2008).

L'évaluation de la vulnérabilité sismique de la Casbah d'Alger a été menée dans le cadre du projet «*PERPETUATE*»⁸ (EU-FP7) qui est financé pour définir les lignes directrices pour l'évaluation et l'atténuation du risque sismique des biens du patrimoine culturel. Une évaluation de la vulnérabilité des maisons de la Casbah d'Alger a été réalisée pour 150 bâtiments historiques à l'aide d'un formulaire de collecte de données quantitatives développé pour enregistrer les typologies les plus courantes de la médina. La description des caractéristiques structurelles et l'identification des paramètres affectant la vulnérabilité sismique sont utilisées comme entrées pour l'application de la procédure numérique FaMIVE.

Celle-ci permet d'identifier les mécanismes d'effondrement des bâtiments inspectés. La distribution des mécanismes d'effondrement et du multiplicateur du facteur de charge est mise en évidence ; les irrégularités identifiées dans l'architecture ottomane affectent la vulnérabilité sismique de l'étude de cas sélectionnée.

La méthode FaMIVE, n'était pas facilement applicable dans la Casbah d'Alger en raison des irrégularités géométriques des constructions historiques. Ainsi, la méthode a été adaptée au centre historique d'Alger en apportant une version plus raffinée de cette approche qui tiendra compte des irrégularités des bâtiments.

⁸ Le projet « PERPETUATE » a pour but de développer une méthodologie pour l'évaluation du risque sismique sur les biens du patrimoine culturel et la conception des interventions. L'objectif principal était de développer des lignes directrices européennes pour l'évaluation et l'atténuation des risques sismiques sur les biens du patrimoine culturel, applicables dans les pays européens et d'autres pays méditerranéens. Tiré et traduit de: http://cordis.europa.eu/result/rcn/57689_en.html 19/01/2018 23 :31.

Dans le même contexte, Viviana Iris Novelli a développé dans le cadre de sa thèse de doctorat intitulée « *Méthode hybride pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique des centres-villes historiques en maçonnerie* » (Iris Novelli, 2017), une approche pour évaluer la vulnérabilité sismique des bâtiments historiques en maçonnerie à l'échelle urbaine. Cette méthode permettrait de réduire les dommages et les pertes dans les centres historiques en utilisant une approche qui considère les causes des modes de défaillance par une méthode analytique et les effets des modes de défaillance grâce à un outil visuel d'inspection. « *La méthode analytique proposée dans l'approche hybride est FaMIVE (Failure Mechanism Identification and Vulnerability Evaluation method), méthode mécanique qui estime les modes de défaillance, les courbes de capacité et de fragilité en tenant compte des caractéristiques géométriques / structurelles et des déficiences des bâtiments. La deuxième méthode est le système basé sur la connaissance du Web LOG-IDEAH (arbres LOGic pour l'identification des dommages dus aux tremblements de terre pour le patrimoine architectural) qui complète FaMIVE en estimant les modes de défaillance par des jugements d'ingénierie codifiés dans des règles développées pour interpréter les dommages sismiques observés sur les bâtiments* » (Iris Novelli, 2017). »

A l'échelle internationale, la question de la vulnérabilité sismique des agrégats historiques est peu développée. Nous commençons tout d'abord par les travaux d'Antonio Formissano sur la question relative au comportement structurel des agrégats historiques en Italie et l'évaluation de leur vulnérabilité sismique (Formissano, et al., 2015). En effet, en 2010, il a publié aux côtés de Raffaele Landolfo, Federico M. Mazzolani et Gilda Florio un chapitre intitulé « *A quick methodology for seismic vulnerability assessment of historical masonry aggregates* » dans le livre « *COST C26 Final Conference Urban Habitat Constructions under Catastrophic Events* » (Formissano, et al., 2015). Ils proposent une méthodologie rapide et simplifiée pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique des unités structurelles dans leur contextes, basée sur une analyse paramétrique d'une unité structurelle typique à Sessa Aurunca, une ville près de Caserte. L'efficacité de la procédure a en outre été prouvée par l'analyse d'une unité de maçonnerie dans le centre historique de Naples avant son application à grande échelle, ce qui a permis de prioriser le degré de vulnérabilité des agrégats lors de différents événements sismiques.

Lors de la conférence de 2014 à Istanbul sur le tremblement de terre et l'ingénierie sismologique, A. Formissano accompagné de Rui Maio, Romeu Vicente et Humberto Varum a publié un article intitulé « *Seismic vulnerability assessment of an old stone masonry building aggregate in San Pio delle Camere, Italy* » (Maio, et al., 2014) dans lequel ils présentent une analyse sismique Pushover sur un agrégat historique composé de 6 maisons. Les résultats obtenus ont permis de soutenir les méthodologies basées sur l'indice de vulnérabilité utilisé pour l'évaluation rapide des grands centres historiques.

Les travaux de recherche de A. Formissano et al soulignent tout d'abord l'importance d'évaluer la vulnérabilité sismique des agrégats qui composent la plupart des centres historiques des villes italiennes et qui représentent une valeur architecturale et historique importante. L'analyse structurale numérique des agrégats historiques est une mission d'une grande difficulté, d'où la

nécessité d'avoir recours à des méthodologies d'évaluation structurelle rapides et fiables pour les centres historiques. L'évaluation de la vulnérabilité sismique des agrégats en maçonnerie représente un réel problème spécifique et d'actualité.

D'autre part, Giovanni Mochi et Giorgia Predari dans leur livre intitulé « *La vulnerabilità sismica degli aggregati edilizi, una proposta per il costruito storico* » (Mochi, et al., 2016) proposent un protocole méthodologique pour évaluer la vulnérabilité sismique des agrégats situés dans les centres historiques. Ce protocole permet également de planifier les opérations de réduction des risques et le suivi des conditions de sécurité (Fig 1.2.8).

«Partant de la reconnaissance du rôle essentiel que joue la qualité de la construction dans la garantie des niveaux de protection et de l'importance des processus de transformation des bâtiments historiques, tels que les principaux éléments de réduction potentielle des performances structurelles, un protocole de fonctionnement est proposé qui se décompose en phases d'analyse à l'échelle urbaine, de recherches archivistiques et d'enquêtes sur la cohérence du bâtiment, pour conduire à l'élaboration d'indicateurs de criticité synthétique qui contribuent à la définition d'un indice de vulnérabilité capable d'identifier la prédisposition de chaque agrégat unique. " (Mochi, et al., 2016).

Le livre propose une analyse et une évaluation de la vulnérabilité sismique de 9 agrégats répartis entre Carpi, Crevalcore, Castelfranco Emilia et Lanciano.



Fig 1.2.8 Exemple de représentation des mécanismes d'endommagement activables. (Source : (Mochi, et al., 2016))

Une analyse macro-élémentaire des mécanismes de défaillance les plus courants est présentée sur la base de plusieurs études de cas ayant subi des dommages structurels suite à des événements sismiques. Ils sont illustrés, schématisés et exemplifiés comme le montrent les Fig 1.2.9 et Fig 1.2.10.



Fig 1.2.9 Exemple d'endommagement par flexion horizontale (source : (Mochi, et al., 2016))



Fig 1.2.10 Exemple d'endommagement par flexion verticale (source : (Mochi, et al., 2016))

La méthodologie présentée dans ce livre est un atout considérable pour estimer le degré de vulnérabilité structurelle des agrégats historiques ainsi que pour détecter les dommages structurels pouvant survenir lors d'un événement sismique. Cependant, cette méthodologie n'inclut pas la simulation numérique ou l'analyse structurelle par Eléments Finis à l'état statique et sismique. Plus tard en 2018, Salvatore Caddemi et al ont publié un livre intitulé « *La vulnerabilità sismica degli edifici storici in aggregato. Nuove metodologie negli approcci speditivi e di modellazione strutturale* » (Caddemi, et al., 2018) sur la vulnérabilité sismique des agrégats historiques. « Le volume rend compte des résultats du projet de recherche FIR 2014 mené à l'Université de Catane, ayant pour objet l'évaluation de la vulnérabilité sismique du petit bâtiment dans le centre historique de la ville. L'analyse des bâtiments inclus dans des zones d'étude représentatives, a permis d'identifier une cellule de base permettant une classification des types de bâtiments en fonction du nombre de cellules et de leur mode de croissance. Une modélisation numérique des classes typologiques a également été réalisée en introduisant différentes variantes géométriques et structurelles.

Les analyses ont été réalisées selon la procédure « par macro-éléments », développée au DICAR de l'Université de Catane et implémentée dans le logiciel 3DMacro.

En complément de l'évaluation de la vulnérabilité sismique des typologies de bâtiments, considérés comme des structures isolées, afin de mettre en évidence le rôle fondamental des liaisons entre bâtiments adjacents, l'étude d'un agrégat structurel a été menée. Les résultats obtenus peuvent constituer une référence utile pour tous les professionnels appelés à s'exprimer sur la vulnérabilité sismique des bâtiments en maçonnerie typiques du bâtiment du XVIIIe-XIXe siècle » (Caddemi, et al., 2018).

Nous clôturons cette première partie de la recherche bibliographique par une synthèse générale. Il est important de préciser au préalable que les recherches et travaux présentés ne sont pas exhaustifs, seules les références les plus pertinentes ayant contribué à la formulation du sujet de thèse et de la problématique générale, ont été présentées.

La comparaison des travaux de recherche a révélé ce qui suit :

1. La reconstruction du centre historique d'Alger après le séisme dévastateur de 1716 a été entreprise en considérant l'aléa sismique. Les nouvelles interventions apportées aux maisons de la Casbah d'Alger se sont manifestées par l'intégration de techniques empiriques traditionnelles basées sur l'expertise de maîtres artisans. Les techniques utilisées ont été extraites des archives ottomanes, de sources historiques et suivies de vérifications in situ par les chercheurs mentionnés précédemment dans cette section. Le niveau d'efficacité des techniques « sismo-résistantes » utilisées dans les maisons de la Casbah d'Alger pour contrer le phénomène sismique (facteur exogène) n'a pas été techniquement démontré par des études approfondies et reste énigmatique. Cependant, la mise à niveau structurelle et la réduction de la vulnérabilité sismique des maisons de la Casbah d'Alger est un problème majeur non résolu.
2. L'une des spécificités de la Casbah réside dans ses matériaux de construction. Ils sont principalement composés de briques, de pierres de taille / gravats, de mortiers à base de chaux et d'argile, de bois (*Thuja*) et de revêtements à base de chaux. Ces matériaux sont élémentaires dans leur composition et pourtant ils confèrent à l'ancienne médina souplesse, organicité et imbrications remarquables. Face à toutes ces spécificités, les travaux sur la caractérisation mécanique des maisons de la Casbah d'Alger, sont très limités. Une connaissance large et approfondie des matériaux de construction (facteur endogène) permet de détecter certaines anomalies structurelles qui leur sont liées. Cependant, la réhabilitation des maisons de la Casbah doit être appuyée et précédée d'une connaissance scrutée des matériaux de construction qui les composent. « *Loin d'être un système architectural et constructif neutre, les maisons traditionnelles de la médina d'Alger sont le résultat d'un avant-projet très soigneusement élaboré. Son processus de construction et d'exécution technique sont basés sur des principes simples, en accord avec les besoins de l'époque, et combiner l'action des ouvriers spécialisés (M'ALLAM) avec les conditions climatiques et les matériaux naturels. Il en résulte une architecture simple, dépourvue de tout élément superflu, dans laquelle chaque composant devient significatif.* » (Missoum, 2003)
3. La réduction de la vulnérabilité sismique des centres historiques est une priorité et un sujet d'actualité depuis les derniers événements sismiques qui ont causé des dégâts considérables.

L'évaluation structurelle des centres historiques ne peut pas être réalisée sur des unités isolées mais doit être considérée dans leur contexte urbain qui, pour la plupart, est regroupé sous forme d'agréats.

« Les agrégats de bâtiments historiques sont le résultat de la croissance progressive des villes, dans lesquelles des étages d'élévation sont ajoutés aux bâtiments existants et des agrandissements de plan sont réalisés en ajoutant des cellules structurelles à celles qui existaient auparavant, de sorte que les unités adjacentes partagent souvent le même mur d'enceinte (Giovinazzi, et al., 2004). En conséquence, il est très difficile, voire impossible, à la fois de distinguer les unités structurellement indépendantes et d'identifier la réponse globale des agrégats de construction (Formissano, et al., 2010). »

La simulation structurelle d'agréats historiques est une tâche de grande difficulté nécessitant des investissements humains et matériels très importants, d'où le nombre limité de recherches dans ce domaine. Des méthodologies alternatives sont proposées par un certain nombre de chercheurs pour une évaluation rapide de la vulnérabilité sismique des centres historiques, principalement à partir des cas d'étude de référence analysés numériquement et d'observations in situ. Cependant, le comportement structurel des agrégats historiques ainsi que la relation entre unités et macrostructures méritent d'être étudiés et explorés.

Nous présenterons dans **Section 1.3** la deuxième partie de la revue de la littérature qui comprend des aspects liés à la méthodologie, au choix du protocole méthodologique, aux techniques et aux outils utilisés.

1.3 Protocole méthodologique général

1.3.1 Introduction

La recherche développée dans cette thèse s'inscrit dans une démarche scientifique déductive basée sur les trois phases suivantes :

1. Observation in situ ;
2. Expérimentation ;
3. Résultats d'interprétation et recommandation.

Cette démarche a permis de mettre en place un processus méthodologique générique indispensable pour conduire cette recherche, il s'appuie sur trois étapes de base comme le montre la (Fig 1.3.1).

- 1- **Phase observatoire** : représente le travail de terrain permettant la mise en place de l'hypothèse et l'acquisition des données à travers :
 - a. La détermination du cas d'étude (agrégat représentatif),
 - b. La réalisation des relevés techniques (photographique, pathologique et architectural) du cas d'étude sélectionné,
 - c. Le prélèvement des échantillons.
- 2- **Phase expérimentale** : permet l'exploitation des données à travers :
 - a. La modélisation architecturale en se basant sur les relevés techniques,
 - b. La caractérisation mécanique des matériaux de construction historiques collectés,
 - c. Les analyses structurales du cas d'étude.
- 3- **Phase d'interprétation des résultats** : permet de :
 - a. Interpréter les résultats obtenus,
 - b. Valider ou invalider les hypothèses,
 - c. Recommander des solutions pour renforcer et améliorer le comportement structurel de l'agrégat.

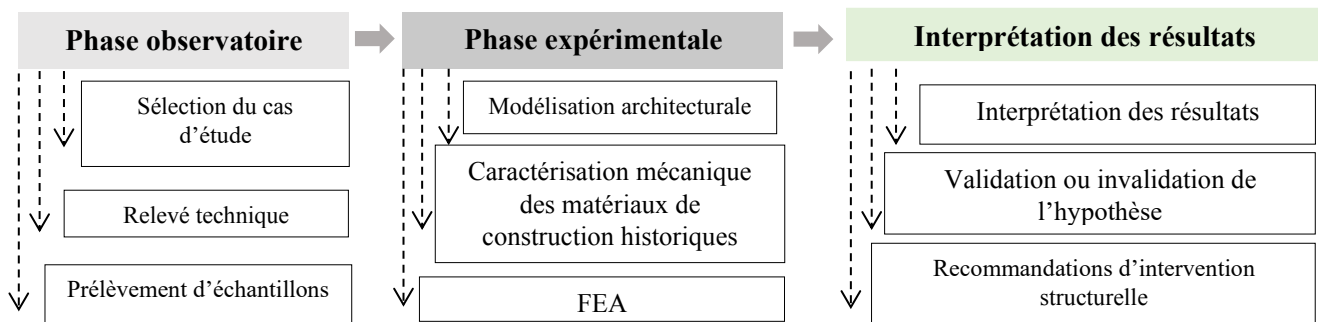


Fig 1.3.1 Schématisation de la méthodologie générale (Source : auteur)

1.3.2 Protocole méthodologique spécifique

Le processus méthodologique représente un maillon très important dans les travaux de recherche scientifique.

En effet, il permet d'harmoniser les différentes composantes de la recherche en assurant le développement d'un cheminement logique conduisant aux principaux objectifs fixés en amont. Afin de proposer un processus méthodologique cohérent pour notre recherche, un certain nombre de références pertinentes sont utilisées et présentées dans ce qui suit. Nous commençons par la recherche menée en 2011 sur le centre historique de la vieille ville de Coimbra au Portugal. Ce centre historique présente diverses similitudes importantes avec la Casbah d'Alger qui sont résumées dans le **Tab 1.3.1**.

	Centre historique de Coimbra au Portugal	Centre historique d'Alger en Algérie
1- Localisation de la zone sismique	Le nord et le centre du Portugal (Coimbra et ses environs)	Le nord de l'Algérie, la région centrale (Alger et ses environs)
2- Période de construction des centres historiques	18 ^{ème} siècle (Vicente, et al., 2011)	18 ^{ème} siècle
3- Reconstruction du centre historique après un séisme dévastateur.	Le tremblement de terre de Lisbonne de 1755 (Vicente, et al., 2011)	Le tremblement de terre de Blida en 1716 (Foufa, et al., 2008)
		
	(Source : http://alpesjudofontaine.fr/wp-content/uploads/2016/06/portugal_2.jpg)	(Source : http://www.canalmonde.fr/r-annuaire-tourisme/monde/cartes/algerie_2.jpg)
4- Matériaux de construction	Maçonnerie traditionnelle de pierre, mortier d'argile/chaux, plancher en bois (Vicente, et al., 2011).	Maçonnerie traditionnelle en pierre / brique, mortier d'argile/chaux, plancher en bois
5- Tissu urbain	Tissu urbain irrégulier et organique composé d'agrégats.	Tissu urbain irrégulier et organique composé d'agrégats.

Tab 1.3.1 Récapitulatif des similitudes entre le centre historique de Coimbra et la Casbah d'Alger (Source : auteur)

Vicente Romeu et al ont procédé à l'évaluation structurelle d'un agrégat comprenant quatre bâtiments appartenant au centre historique de Coimbra au Portugal (**Fig 1.3.2**), contre les charges verticales et leur capacité à résister aux efforts horizontaux dus à l'événement sismique (Vicente, et al., 2011).

Les résultats ont permis d'évaluer la fragilité structurelle de l'agrégat (Fig 1.3.3), de détecter les dommages causés, et de proposer trois renforcements techniques pour l'amélioration du comportement structurel des bâtiments. Les différentes techniques proposées ont été suivies d'une série de modélisation et de simulation par Eléments Finis pour vérifier leur efficacité.

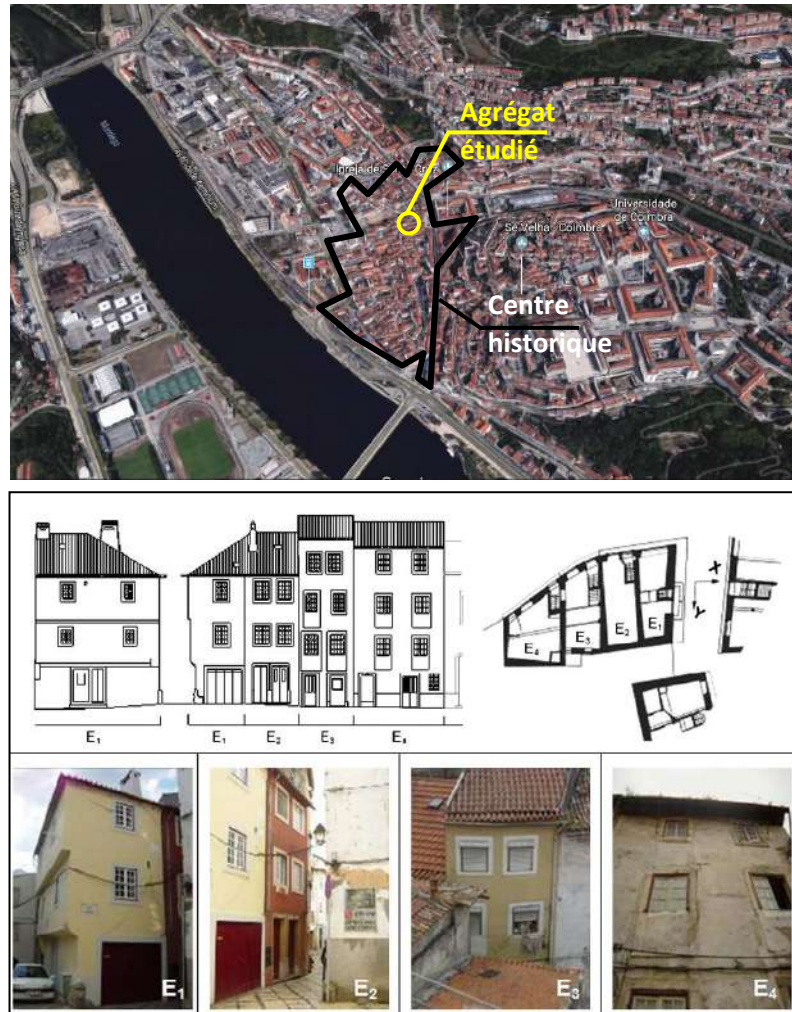


Fig 1.3.2 (en haut) Vue satellitaire du centre historique de Coimbra, Portugal
(Source : <https://www.google.dz/maps/@40.1995134,-429816,1526a,35y,39.04t/data=!3m1!1e3>)

Fig 1.3.3 (en bas) Configuration de l'agrégat étudié, centre historique de Coimbra, Portugal
(Source : (Vicente, et al., 2011))

L'analyse structurale de l'agrégat à l'état sismique a été développée à l'aide du programme (logiciel) "Robot Millennium v17.5" utilisant sur les Eléments Finis. La géométrie structurelle des bâtiments est obtenue à l'aide de dessins de conception assistée par ordinateur (CAO) complétés par des visites techniques.

Nous résumons les différentes phases de cette recherche dans la Fig 1.3.4. La nécessité d'évaluer le comportement sismique et structurel des bâtiments traditionnels en maçonnerie est une question clé.

Cela permettra de détecter les anomalies structurelles puis de proposer des solutions tangibles pour attribuer au bien patrimonial une meilleure résistance aux forces horizontales principalement causées par les séismes. Une connaissance large et approfondie du monument historique d'un point de vue architectural et structurel est une étape essentielle pour assurer sa préservation et sa durabilité.

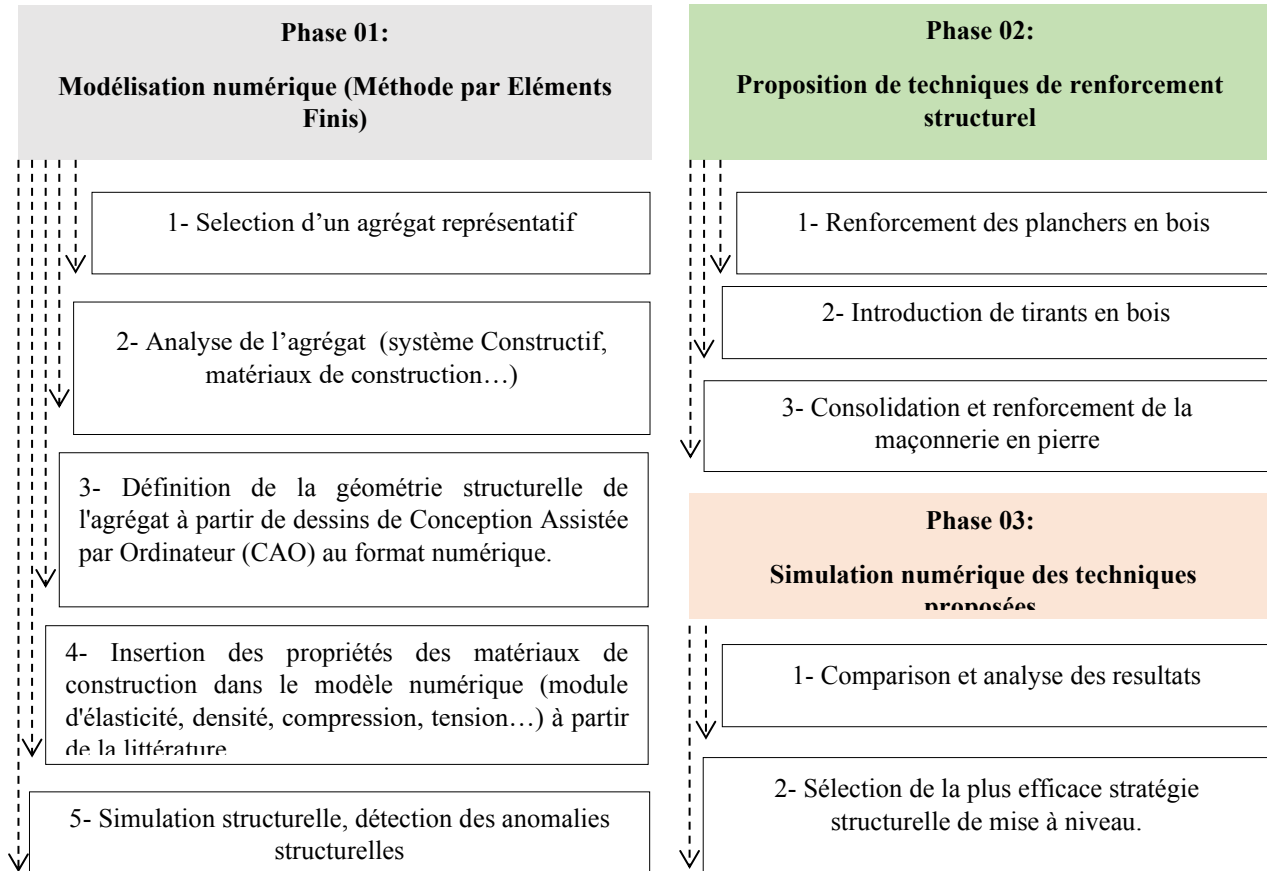


Fig 1.3.4 Méthodologie générale pour l'évaluation structurelle de l'agrégat dans le centre historique de Coimbra, Portugal. (Source : Auteur)

L'architecture vernaculaire telle que la Casbah d'Alger qui représente 95% de l'environnement bâti jusqu'à l'ère industrielle (Rapoport, 1969), est une figure emblématique du paysage urbain et rural dans plusieurs villes du monde telles que : Alger, Fès, Tunis, Lisbonne, Séville ... Elle occupe aujourd'hui la majeure partie du patrimoine architectural mondial.

Cette architecture symbolise le savoir-faire traditionnel et local des générations précédentes principalement basé sur l'utilisation de matériaux locaux et de dispositifs empiriques (W. Caves, 2005).

Cette architecture, qui reflète dans la plupart des cas un mode de vie typique, alliant fonction et esthétique, a tendance à être négligée face aux singuliers monuments historiques emblématiques ou sites archéologiques.

L'intervention sur l'architecture vernaculaire est très alambiquée en raison principalement du caractère irrégulier de l'architecture et de l'organicité du tissu urbain.

Cependant, la réalisation d'un relevé architectural suivi d'une modélisation 3D est une étape essentielle dont la principale difficulté est la représentation correcte et précise de formes géométriques complexes imbriquées et biscornues.

Pour cette raison, il est recommandé de respecter un processus spécifique qui permet d'obtenir un haut degré de précision du modèle 3D final. L'introduction de la numérisation 3D dans le monde des bâtiments patrimoniaux a profondément révolutionné toutes les procédures d'arpentage, de modélisation et d'analyse. En effet, l'utilisation de nouveaux outils et techniques de scan 3D tels que SLAM, le scanner laser 3D, le drone ... et bien d'autres technologies, permet aujourd'hui non seulement de gagner un temps considérable lors du relevé architectural, mais aussi et surtout la numérisation de tous les détails architecturaux, structurels et environnementaux.

Le passage d'un nuage de points obtenu lors du scan 3D (acquisition de données) à un modèle architectural BIM (traitement de données) exploitable dans diverses analyses (analyse de données) représente la méthodologie adoptée par plusieurs chercheurs compte tenu du haut degré de précision du modèle géométrique obtenu. En effet, cette dernière est ensuite exploitée dans divers domaines comme : Analyse structurelle par Eléments Finis FEA, (Clementi, et al., 2016), (Lubowiecka, et al., 2009), (Sante olivito, et al., 2019), (Barazzetti, et al., 2015), Réalité Virtuelle RV (Banfi, 2019), ontologie (Quattrini, et al., 2017) etc.

Le workflow du nuage de points au BIM en passant par FEA, a été appliqué à différents cas d'étude de typologies différentes (églises, ponts, visites...) en tenant compte des spécificités de chacune (Fig 1.3.5). Il est important de noter que la même méthodologie et processus appliqués aux agrégats historiques à l'échelle des macrostructures sont très limités. Il est à noter que travailler sur une Architecture Vernaculaire historique complexe nécessite des techniques spécifiques et précises dont l'application d'outils et de logiciels ne s'y adapte pas forcément.

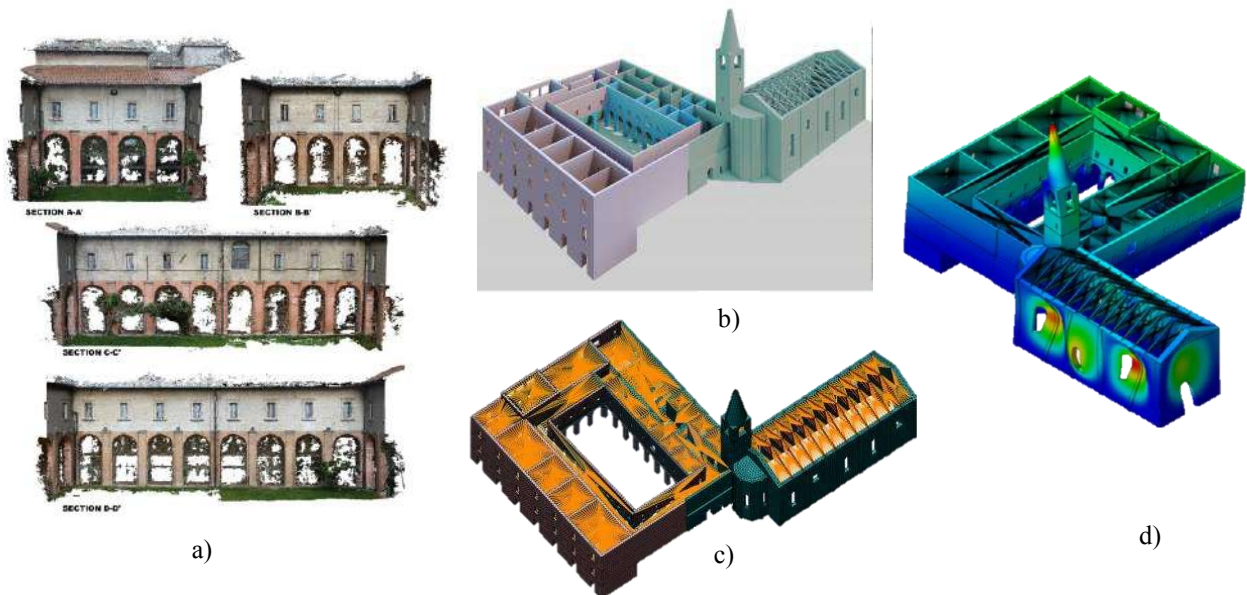


Fig 1.3.5 Exemple d'un workflow du nuage de points au BIM en passant par FEA appliqué au complexe historique de «San Francesco» situé à Cagli, région des Marches, Italie (Clementi, et al., 2016)

a) Nuage de point obtenu en utilisant la photogrammétrie, b) modélisation architecturale, c) maillage 3D par éléments finis, d) résultat de l'analyse modale par éléments finis.

En se référant à la revue de littérature présentée dans la Section 1.3, nous proposons pour notre recherche le processus méthodologique spécifique suivant qui est schématiquement résumé dans la Fig 1.3.6.

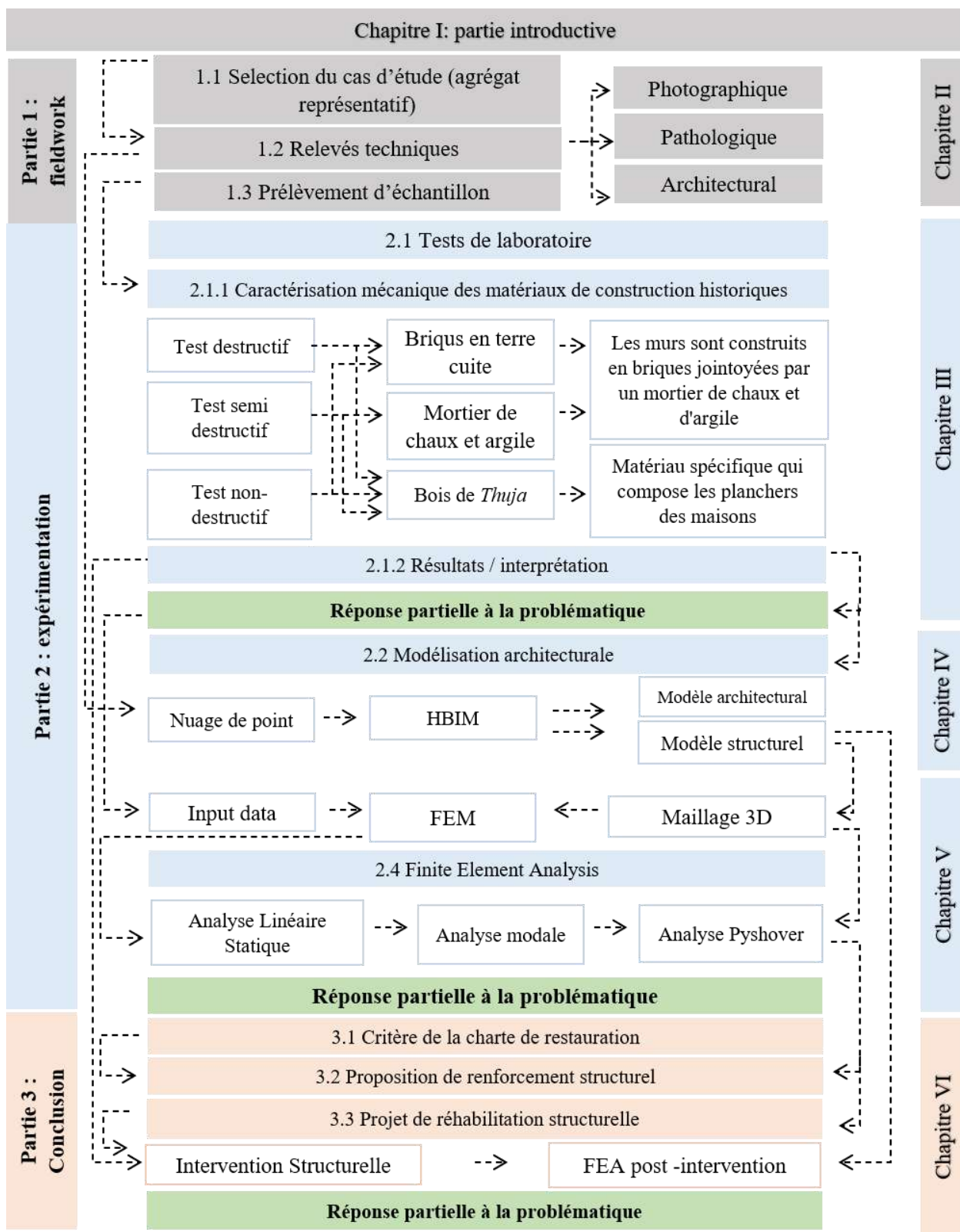


Fig 1.3.6 Organigramme du protocole méthodologique général spécifique (Source : auteur)

1.3.2.1 Description du processus méthodologique

Le processus méthodologique est composé de trois parties principales, à savoir : (1) le travail de terrain, (2) l'expérimentation et (3) la conclusion qui sont divisées en 5 chapitres. Les processus méthodologiques spécifiques des différentes parties seront détaillés dans les chapitres suivants. Nous présentons ci-dessous une description générale de leurs contenus respectifs.

Chapitre I : Contexte général de la recherche

Le chapitre introductif de la thèse est d'abord consacré à la présentation du contexte général ainsi qu'à l'intérêt et à la pertinence du sujet de recherche.

En second lieu, ce chapitre comprend toute la partie relative à la revue de la littérature ainsi que les références nationales (algériennes) et internationales qui ont contribué à la formulation du sujet ainsi qu'à la méthodologie de recherche.

Chapitre II : investigation in situ

Le deuxième chapitre est consacré à l'enquête in-situ, c'est-à-dire à la sélection du cas d'étude (agrégat) le plus représentatif de la Casbah d'Alger sur la base de plusieurs critères. Il comprend une description détaillée de tout le travail effectué sur le terrain.

Nous commençons tout d'abord par le relevé photographique 3D afin d'analyser l'état de conservation. Nous poursuivons dans un second temps par le relevé architectural à l'aide du Scanner Laser 3D qui a permis d'obtenir 188 nuages de points correspondant à l'ensemble de l'agrégat qui sont gérés et assemblés en un nuage de points final à l'aide de plusieurs logiciels.

Nous présenterons également les échantillons prélevés in-situ pour la caractérisation mécanique nécessaire lors de l'analyse structurelle.

Enfin, nous concluons par la restitution du relevé de l'état de conservation et pathologies à partir des deux relevés architectural et photographique.

Chapitre III : Analyse de laboratoire

Le troisième chapitre est consacré à la caractérisation mécanique des matériaux de construction historiques (briques en terre cuite, mortier de chaux / argile et bois de *Thuja*) extraits de la Casbah d'Alger. Trois types de tests sont développés, à savoir : les tests destructifs, les tests semi-destructifs et les tests non-destructifs.

Les tests destructifs sont réalisés sur :

1. Les briques en terre cuite pour obtenir le module de Young, le coefficient de Poisson, la résistance à la compression et la courbe du comportement élasto-plastique qui sont utilisés dans la FEA.
2. Le bois de *Thuja* pour obtenir le module de Young, la résistance à la compression ainsi que la courbe du comportement élasto-plastique qui sont utilisés dans la FEA.

Les tests semi-destructifs sont exécutés sur :

1. Un fragment de mur en maçonnerie en appliquant le test du pénétromètre pour évaluer la qualité du mortier puis estimer sa résistance à la compression.
2. Le bois de *Thuja* à l'aide d'un résistographe afin d'évaluer l'homogénéité des fibres et la résistance à la pénétration (perforation).

Les tests non destructifs sont appliqués sur :

1. Les briques en terre cuite en utilisant un test ultrasonique afin d'évaluer la densité et l'homogénéité.
2. Le bois de *Thuja* en appliquant un capteur d'humidité relatif ainsi qu'un test ultrasonique afin d'évaluer la densité et l'homogénéité.

Chapitre IV : Modélisation architecturale

Le quatrième chapitre est consacré à la modélisation architecturale en expliquant les différentes phases du passage d'un nuage de points au modèle HBIM (Heritage Building Information Modeling). Sur la base d'un ensemble de logiciels (Recap, Autocad, Rhinoceros et Revit) et grâce à l'échangeabilité entre les programmes par les différents formats disponibles (pts / dwg / rvt / acis), il est possible d'obtenir à la fin du processus de modélisation un modèle très précis le plus représentatif du nuage de points qui peut être exploitable dans différentes analyses.

Un modèle architectural contenant tous les détails architecturaux et architectoniques est d'abord créé. Ce modèle est utilisé pour développer une analyse de stratification de l'agrégat.

Un modèle structurel contenant uniquement les éléments structurels est créé par la suite pour développer une analyse structurelle par le logiciel d'analyse par Eléments Finis Abaqus.

Chapitre V : Analyse structurelle

Le cinquième chapitre est consacré à l'analyse structurelle de l'agrégat. Avant de lancer les différentes analyses, il est indispensable de vérifier le maillage et la compatibilité géométrique du modèle structurel obtenu dans la partie III par le logiciel d'analyse par Eléments Finis ABAQUS. Trois types d'analyses sont développés :

1. Analyse Statique Linéaire sous l'effet de la gravité,
2. Analyse modale,
3. Analyse statique non linéaire (Pushover).

Chapitre VI : Proposition d'intervention

Le sixième chapitre est destiné à la proposition d'intervention structurelle afin d'améliorer le comportement structurel général de l'agrégat. La proposition se fonde évidemment sur les résultats obtenus dans les parties précédentes ainsi que sur les critères d'intervention mentionnés dans la charte de restauration et de réhabilitation.

1.3.2.2 Outils et Matériels spécifiques

Afin d'atteindre les objectifs, répondre à la problématique et assurer une application efficace des différentes phases de la recherche, plusieurs logiciels et outils spécifiques indispensables sont illustrés dans le **Tab 1.3.2**.

Phase de recherche	Logiciel / outil	Details	Illustrations
Phase 1: fieldwork Chapitre II	Le laser scanner 3D	Il permet la réalisation d'un relevé architectural et photographique complet et précis en trois dimensions (3D) et l'obtention d'un nuage de points qui sera exploité dans la modélisation architecturale.	
	Le distancemètre	Il sert à compléter le relevé architectural en prenant quelques mesures supplémentaires.	
	Caméra photographique professionnelle	Il permet de prendre des photographies in situ et des détails architecturaux et structurels. Il permet de compléter le relevé photographique.	
	Logiciels Recap d'Autodesk et Scene	Ils permettent le nettoyage des nuages de points obtenus ainsi que leur assemblage.	

Phase 2: expérimentale	Chapitre III	Logiciels Recap, Revit, Autocad, et Rhinoceros	Ils permettent la modélisation architecturale du cas d'étude avec un haut degré de précision et le passage d'un nuage de points au modèle HBIM.	
	Chapitre IV	Machines et dispositifs spécifiques pour la caractérisation mécanique des matériaux de construction historiques	Voir Chapitre 4	
	Chapitre V	Logiciel d'Analyse par Eléments Finis Abaqus	Il permet la simulation structurelle du cas d'étude.	
Phase 3: Conclusion	Chapitre VI	Logiciel d'Analyse par Eléments Finis Abaqus	Il permet la simulation structurelle post-intervention du cas d'étude.	

Tab 1.3.2 Outils et matériels spécifiques utilisés dans la recherche (Source : auteur).

1.4 Conclusion

En tant que l'une des architectures vernaculaires les plus prestigieuses et faisant partie du paysage pittoresque d'Alger, la Casbah a été classée au patrimoine mondial de l'UNESCO depuis 1992. Bien que semblable à de nombreuses autres villes historiques du monde, la Casbah d'Alger est constamment menacée par des facteurs d'altération endogènes et exogènes tels que les tremblements de terre, menaçant ainsi son intégrité et sa durabilité. Située sur la côte algérienne, connue pour sa forte activité sismique, la Casbah a été reconstruite après le séisme dévastateur de 1716, qui a permis la mise en place de plusieurs renforcements structurels tant à l'échelle des agrégats que des maisons.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principales recherches précédentes relatives au caractère « sismo-résistant » des maisons de la Casbah d'Alger qui, jusqu'à présent, aucune démonstration scientifique ne semble avoir été réalisée.

D'autre part, la revue de littérature nous a renseigné sur un nombre limité de références et de travaux relatifs à la caractérisation mécanique des matériaux de construction des maisons de la Casbah d'Alger. De plus, l'analyse et la simulation numérique du comportement structurel et sismique des agrégats est un sujet d'actualité dont les travaux de recherche sont très limités et qui mérite d'être exploré.

Nous présenterons dans le prochain chapitre le choix du cas d'étude, les critères de sélection ainsi que les relevés techniques.

Chapitre 2

Investigations in-situ

2.1 Analyse urbaine

2.1.1 Introduction

La réalisation d'un travail de recherche sur les maisons de la Casbah d'Alger au niveau des agrégats ou des macrostructures représente une échelle intermédiaire entre l'échelle urbaine et celle de l'unité d'habitation. La sélection d'un agrégat représentatif de la Casbah d'Alger pour une analyse structurelle par Eléments Finis nécessite d'abord une lecture urbaine générale du tissu traditionnel préalablement établi. En effet, ce dernier permet de mettre en évidence certains aspects historiques, morphologiques, typologiques et constructifs qui sont considérés en tant que critères de sélection du cas d'étude.

L'application de l'analyse typo-morphologique sur la Casbah d'Alger est le choix optimal pour les tissus urbains traditionnels. Cette méthode a été développée pour la première fois par Saverio Muratori⁹ de l'École italienne d'architecture durant les années 1960 et par ses élèves successeurs, dont Gianfranco Caniggia¹⁰ était une figure emblématique. Cette méthode combine l'étude de la morphologie urbaine et celle de la typologie architecturale, à savoir entre les deux disciplines que sont l'urbanisme et l'architecture. La morphologie urbaine repose sur quatre systèmes : (1) le système parcellaire, (2) le système routier, (3) le système bâti et (4) le système d'espaces libres (Borie, 1984).

D'autre part, la typologie architecturale consiste à classer les composants de l'ensemble, à savoir les unités d'habitation selon des critères dimensionnels, fonctionnels, structurels et autres.

La combinaison des deux disciplines permet d'abord de comprendre la logique relationnelle entre la morphologie du tissu urbain et la répartition des unités. De plus, grâce à l'analyse typologique des différents agrégats, le noyau proto-urbain original peut être déterminé. Ce dernier permet d'identifier les différentes évolutions, constructions et agrégations des unités puis de déterminer les différentes typologies d'agrégats.

Cependant, l'application complète et détaillée d'une telle analyse à l'échelle de la médina représente une thèse en soi et risque de ramifier davantage le sujet de la thèse. Ainsi, nous nous baserons sur une analyse urbaine horizontale des différents agrégats pour mettre en évidence les points communs, ce qui permettra de définir les premiers critères de sélection du cas d'étude.

⁹ (1910-1973) Architecte italien considéré comme le fondateur de la typo-morphologie. Il a enseigné à Venise en 1950 puis à Rome en 1964. Il a publié «*Studi per una operante storia urbana di Venezia*» (Études pour une histoire urbaine opérationnelle à Venise), en 1959 et «*Studi per una operante storia urbana di Roma*» (Études pour une histoire urbaine opérationnelle de Rome) en 1963.

¹⁰ (1933-1987) Architecte italien considéré comme une figure importante de l'approche typo-morphologique, il publie en 1963 «*Lecture di una città*» (lectures de la ville) dont l'introduction a été écrite par Muratori. L'ouvrage propose une lecture morphologique systématique de la ville et se présente à la fois comme l'analyse d'une ville particulière, Florence, et en même temps sa structure très claire en fait un manuel de l'approche typo-morphologique. Il a beaucoup travaillé pour étudier et conserver les anciens centres historiques en Italie et en Afrique du Nord et pour redécouvrir les principes qui ont guidé la production urbaine, en utilisant une approche historiciste. Enfin, G. Caniggia se distingue par ses efforts pour opérationnaliser les concepts et les approches développés par ses collègues (FUSCO, 2012).

2.1.2 Sous-secteurs de la Casbah d'Alger

Le « *Plan Permanent de Sauvegarde et de Mise en Valeur des Sous-secteurs Sauvegardés PPSMVSS* » de la Casbah d'Alger accompagné de son règlement spécifique (Wilaya d'Alger, 2012) divisent le tissu urbain traditionnel de la médina en quatre sous-secteurs énumérés comme suit :

Sous-secteur 1

Il couvre la partie du territoire située au centre, entre la rue Mohamed Azzouzi au Nord et la rue Mohamed Benguenif au Sud et comprend les quartiers de Mer Rouge, Amar Ali et Sidi Ramdane. Caractérisée par des typologies résidentielles variant entre la maison patio, la maison à *Chebbek* et la maison *Aloui*, elle correspond à la partie de la Casbah où les constructions traditionnelles sont conservées dans leur état originel, ayant subi très peu de transformations.

Sous-secteur 2

Il couvre la partie périphérique du secteur sauvegardé situé entre la rue Debih Cherif et la rue Boualem Bengana ainsi que la rampe Louni Arezki. Il est constitué des quartiers périphériques de la Casbah d'Alger et caractérisé par une typologie résidentielle composée principalement d'immeubles d'habitation. Il couvre également la partie basse de la Casbah ainsi que les bâtiments d'architecture coloniale qui se sont conformés aux premiers schémas de rectification urbaine imposés par l'administration coloniale après les opérations de démolition et de transformation urbaine imposées après 1832 (Hadjilah, et al., 2019).

Sous-secteur 3

Il couvre la partie du territoire située à l'Est du Sous-secteur 1, entre les rues Bab El Oued - Bab Azzoun et est déployé sur les quartiers périphériques d'Amar el Kama, Souk el Djemaa et Lalahoum. Ce secteur se caractérise par une typologie de l'habitat constituée de logements traditionnels largement modifiés et transformés.

Sous-secteur 4

Il couvre la partie Est du territoire, qui représente la jetée Kheireddine (Amirauté). Nous présentons dans la **Fig 2.1.1** un plan général de la Casbah d'Alger ainsi que la délimitation des Sous-secteurs mentionnés ci-dessus. Le cas d'étude sélectionné doit appartenir au Sous-secteur 1 puisqu'il représente la partie la plus authentique de la médina. Cela représente le premier critère de sélection de l'agregat représentatif.

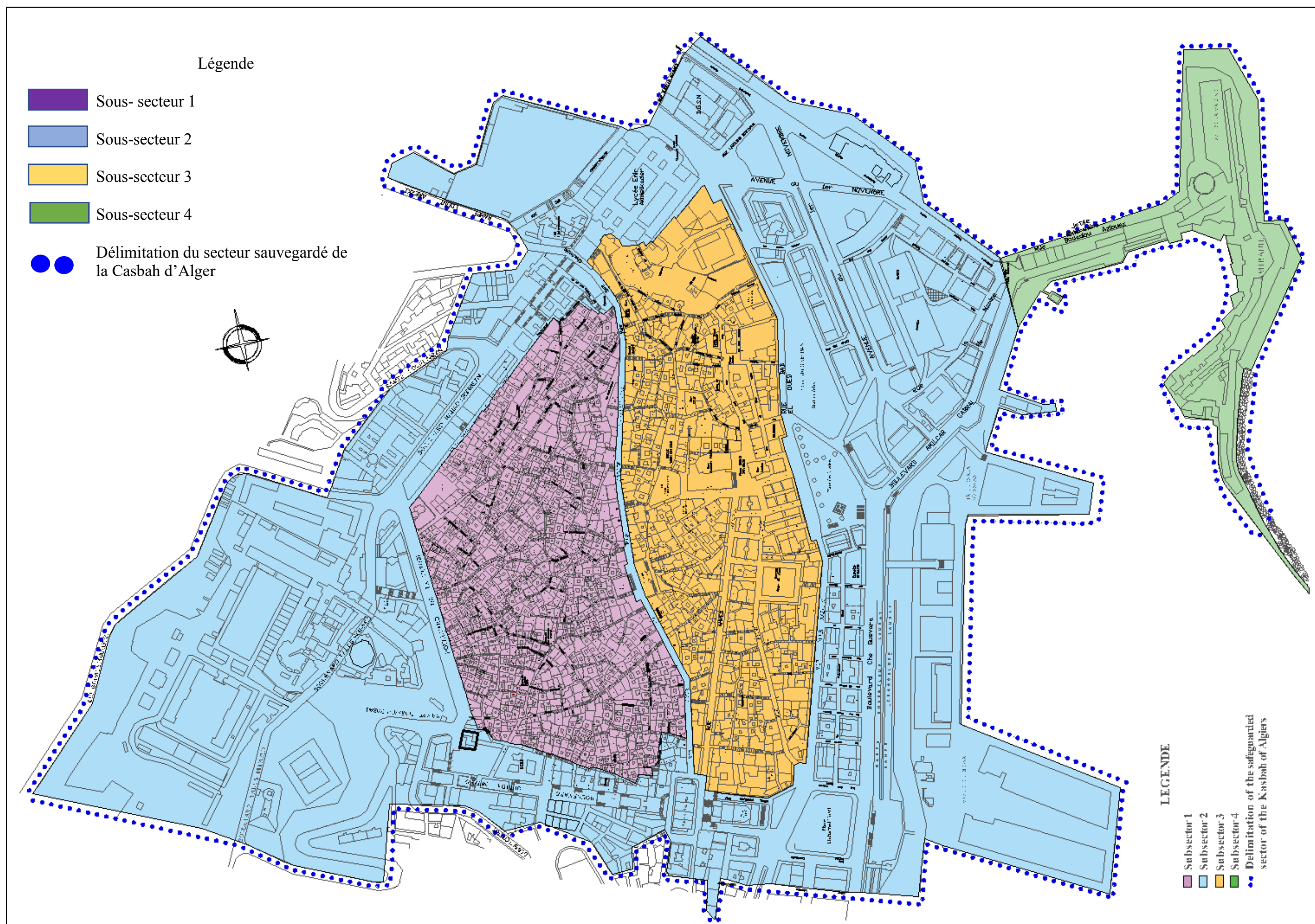


Fig 2.1.1 Délimitation des sous-secteurs de la Casbah d'Alger (Source : auteur)

2.1.3 De la typologie architecturale à la classification des agrégats

Les agrégats composant le tissu urbain traditionnel de la Casbah d'Alger sont composés de plusieurs maisons de typologies architecturales diverses. Ces dernières sont accolées les unes aux autres en partageant des murs communs. De plus, de nombreux entrelacements sont notés dans plusieurs agrégats où il existe des chevauchements d'espaces architecturaux entiers tel que présenté dans la **Section 1.1.1**. Cependant, il convient de présenter en amont les typologies architecturales des maisons de la Casbah d'Alger qui sont de l'ordre de trois, à savoir :

- 1- La maison avec patio (**Fig 2.1.2 a**) : maison traditionnelle introvertie typique de la Casbah, les espaces constitutifs de la maison s'organisent autour d'un espace central appelé "Wast-Ed-Dar" (le patio) entouré de galeries permettant un éclairage zénithal et une ventilation permanente.
- 2- La maison à *Chebbek* (**Fig 2.1.2 b**) : maison traditionnelle dont la surface est moins importante que la 1^{ère} typologie. Elle est équipée d'un puits de lumière permettant un éclairage zénithal et recouverte d'une grille dite "*Chebbek*".
- 3- La maison dite *Aloui* (**Fig 2.1.2 c**) : maison traditionnelle représentant la plus petite typologie architecturale de la Casbah, organisée verticalement autour d'un escalier.

La **Fig 2.1.2** présente un aperçu général des différentes typologies architecturales.

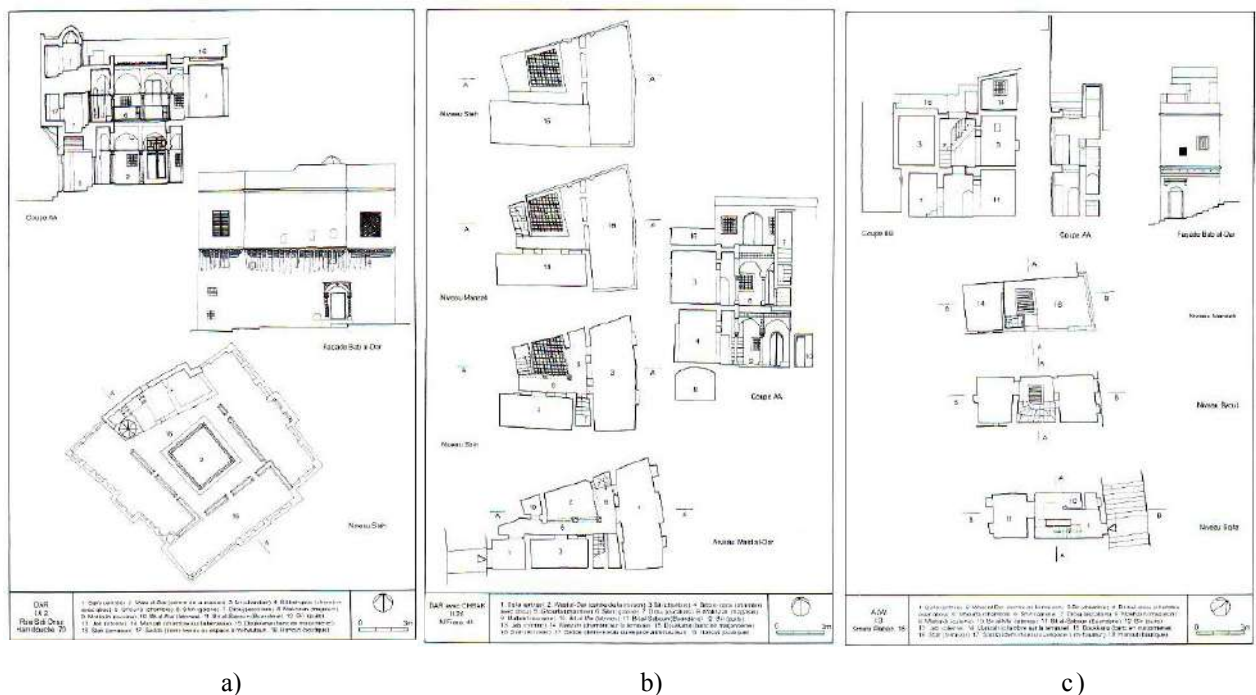


Fig 2.1.2 Typologies architecturales des maisons de la Casbah d'Alger (Source : (Missoum, 2003))

La répartition des différentes typologies architecturales des maisons diffère d'un agrégat à l'autre. Pour cette raison, il est important d'effectuer une analyse urbaine horizontale des différents agrégats afin d'identifier la composition typologique de chaque macrostructure. Cependant, les agrégats appartenant au Sous-secteur 1 sont numérotés de 1 à 66 et identifiés dans la **Fig 2.1.3**, les paramètres suivants sont attribués à chacun d'eux: (1) le nombre total d'unités, (2) le nombre d'unités représentant des maisons authentiques en définissant leurs typologies architecturales, (3) le nombre d'impasses (4) la surface en (m²) et (5) le nombre d'unités représentant d'autres typologies architecturales (construction récente et française, bâtiment de culte et parcelles vides). Les résultats sont présentés dans le **Tab 2.1.1**.

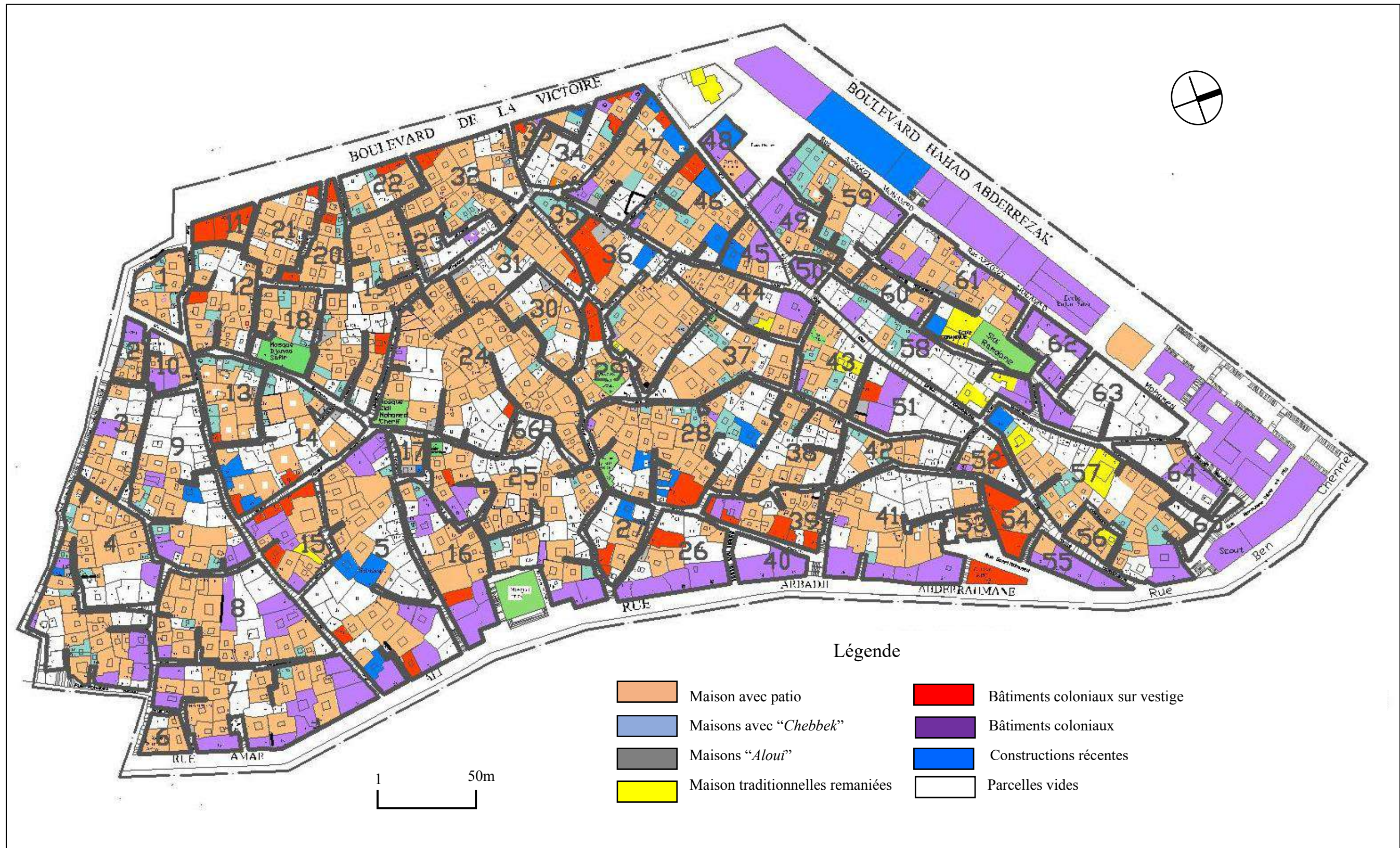


Fig 2.1.3 Sous-Secteur 1 : répartition des agrégats (Source : auteur)

Agrégat	Nombre d'unités	Surface (m²)	Typologies architecturales authentiques des maisons			Typologies architecturales diverses	Nombre Impasses	Agrégat	Nombre d'unités	Surface (m²)	Typologies architecturales authentiques des maisons			Typologies architecturales diverses	Nombre Impasses
			Maison avec patio (%)	Maison avec Chebbek (%)	Maison Aloui (%)						Maison avec patio (%)	Maison avec Chebbek (%)	Maison Aloui (%)		
1	14	810	43	21	7	29	0	34	22	1361	0	5	0	95	0
2	8	401	50	13	13	25	0	35	5	317	60	40	0	0	0
3	16	1295	56	0	0	44	0	36	32	2860	50	3	6	41	2
4	58	4615	45	16	2	38	5	37	23	1882	48	17	0	35	0
5	52	5426	31	0	2	67	3	38	25	1567	44	4	8	44	2
6	4	409	50	0	0	50	0	39	18	1201	50	0	0	50	1
7	36	3689	50	6	3	42	4	40	3	654	0	0	0	100	0
8	33	3390	64	6	0	30	2	41	34	3589	38	3	0	59	3
9	44	3395	30	7	0	64	3	42	17	1014	29	18	0	53	0
10	9	550	44	0	0	56	1	43	18	1242	33	17	0	50	0
11	5	457	40	0	0	60	0	44	16	1370	63	0	6	31	1
12	25	1680	56	8	8	28	2	45	7	658	57	0	0	43	0
13	19	1215	47	26	5	21	0	46	22	1827	50	14	0	36	2
14	41	2680	29	12	7	51	3	47	27	1822	37	7	4	52	1
15	16	1421	44	0	0	56	1	48	6	521	0	0	0	100	0
16	21	2019	43	10	0	48	0	49	10	841	40	20	0	40	0
17	6	299	50	0	17	33	0	50	3	181	0	0	33	67	0
18	14	1217	57	14	0	29	1	51	10	1383	10	0	10	80	0
19	46	3128	61	11	4	24	4	52	8	568	38	0	0	63	0
20	13	877	54	15	0	31	0	53	4	312	75	0	0	25	0
21	18	1164	61	0	0	39	0	54	6	665	50	0	0	50	0
22	12	804	42	17	0	42	0	55	6	594	17	0	0	83	0
23	13	678	31	0	15	54	0	56	4	393	75	0	0	25	0
24	74	5545	64	3	3	31	7	57	42	3797	40	17	0	43	4
25	60	4426	38	5	0	57	4	58	26	2156	4	12	0	85	1
26	15	1761	27	0	7	67	0	59	24	2103	29	29	0	42	3
27	12	940	25	0	0	75	0	60	7	534	29	14	0	57	0
28	57	4106	46	9	4	42	4	61	29	2762	31	0	14	55	1
29	13	897	54	0	0	46	0	62	8	755	0	0	13	88	0
30	14	1159	50	14	7	29	0	63	16	1840	0	0	0	100	2
31	25	1622	44	4	4	48	1	64	10	947	10	0	0	90	0
32	34	2103	56	9	3	32	1	65	4	402	0	0	0	100	0
33	8	390	38	13	0	50	0	66	4	253	50	0	0	50	0

Tab 2.1.1 Résultats de l'analyse urbaine horizontale des différents agrégats (Source : auteur)

En analysant les données du **Tab 2.1.1**, nous notons ce qui suit :

1. La typologie architecturale traditionnelle la plus dominante dans tous les agrégats est la maison à patio avec une moyenne générale de 77%. La maison à *Chebbek* occupe la deuxième position avec une moyenne générale de 15% tandis que la maison *Aloui* est nettement moins présente et absente dans plusieurs agrégats avec une moyenne générale de 8% (**Fig 2.1.4**).

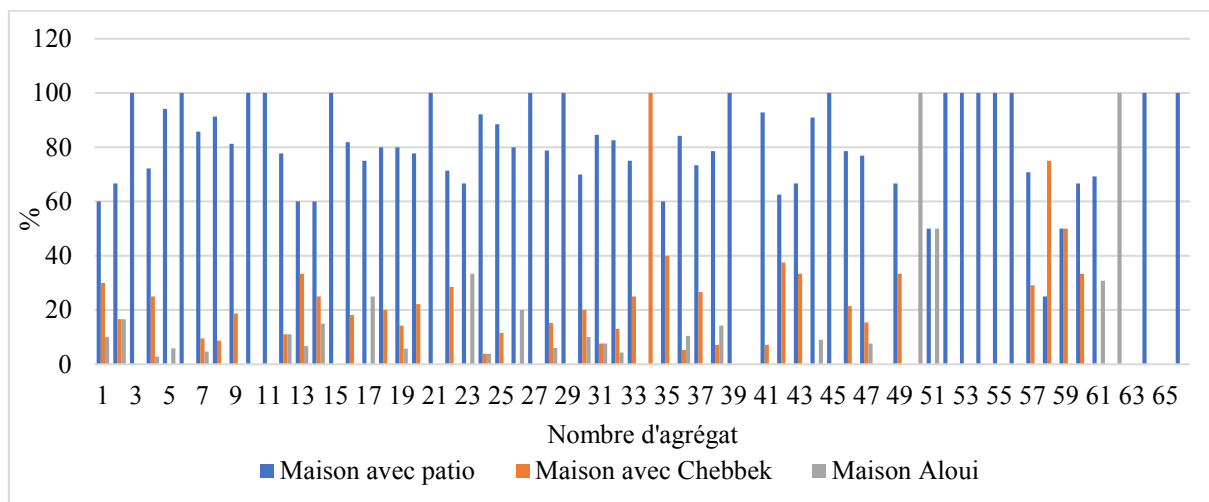


Fig 2.1.4 Distribution des typologies architecturales dans chaque agrégat appartenant au Sous-Secteur 1
(Source : auteur)

2. Les événements sociopolitiques auxquels la médina est confrontée depuis son édification ainsi que son développement diachronique et synchronique ont cédé la place à l'émergence de nouvelles constructions dans plusieurs agrégats, certains datent de la période d'occupation française tandis que d'autres de la période postindépendance. En effet, la **Fig 2.1.5** montre que 55% des typologies architecturales sont traditionnelles et authentiques tandis que 45% des constructions appartiennent à d'autres typologies architecturales non authentiques.

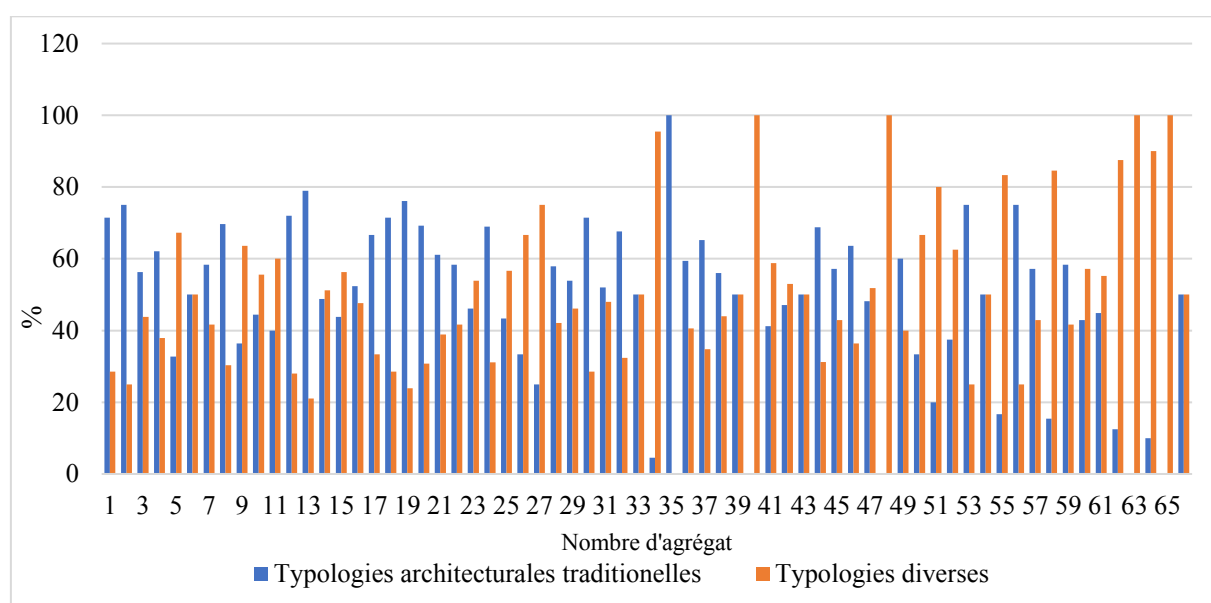


Fig 2.1.5 Comparaison entre les typologies architecturales authentiques et non authentiques dans chaque agrégat (Source : auteur)

3. Le Sous-secteur 1 est composé de 66 agrégats de tailles différentes, le nombre d'unités de construction agrégées (maisons, mosquées ou autres) varie de 4 à 74. On constate également une corrélation directe entre le nombre d'unités et la présence d'impasses comme le montre la **Fig 2.1.6**. En effet, ces dernières jouent un rôle extrêmement important car elles desservent les unités de construction situées au centre de l'agrégat et les relient aux ruelles principales. Cependant, les impasses représentent des failles qui percent les agrégats à différents endroits, ce qui pourrait influencer la réponse structurelle générale des macrostructures. Par conséquent, trois catégories d'agrégats peuvent se démarquer, à savoir : (1) les agrégats compacts de petite ou moyenne taille sans impasse, (2) les agrégats semi-ramifiés de taille moyenne ou grande contenant 1 à 3 impasses et, (3) les agrégats ramifiés de grande ou très grande taille contenant 4 à 7 impasses. Les différents agrégats sont regroupés, répertoriés et schématisés dans le **Tab 2.1.2**.

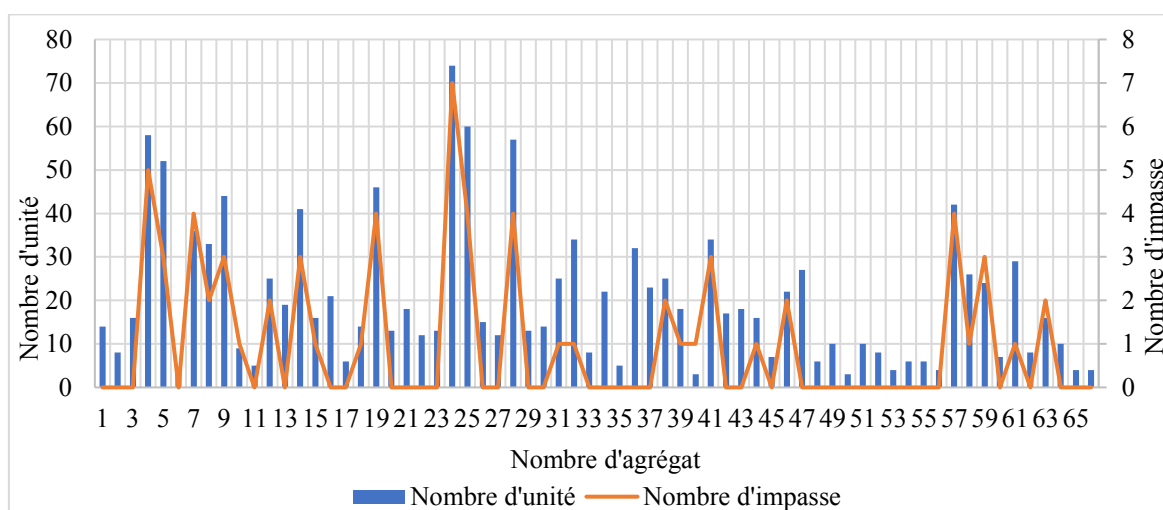


Fig 2.1.6 La relation entre le nombre d'unités composant les agrégats et le nombre d'impasses (Source : auteur)

4. Les agrégats compacts représentent clairement la catégorie dominante du Sous-secteur 1 avec un pourcentage de 58% comme le montre la **Fig 2.1.7**. En outre, il est important de se rappeler que certains agrégats sont interconnectés les uns avec les autres par des *sabats* et / ou des arcs en maçonnerie tel présenté dans la **Section 1.1.1**.

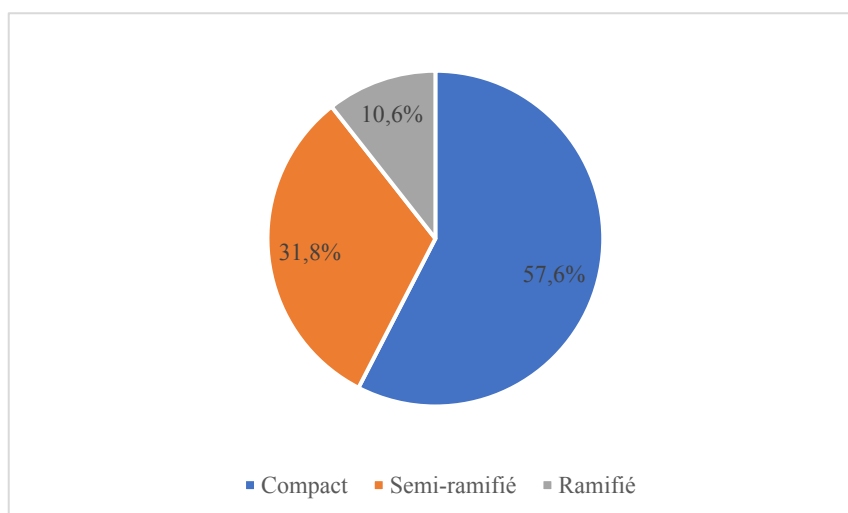
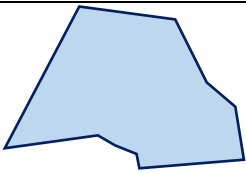
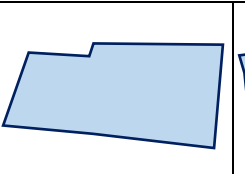
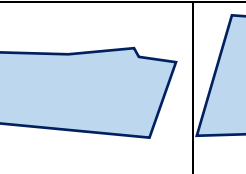
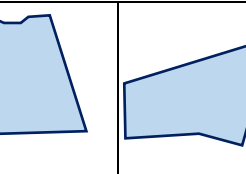
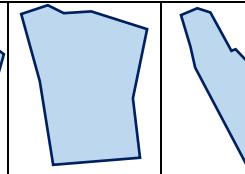
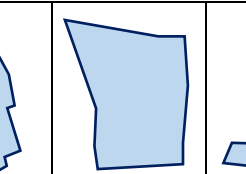
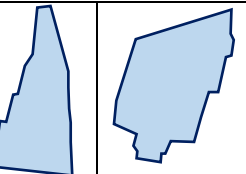
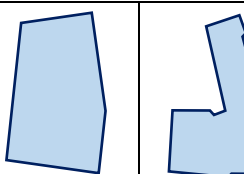
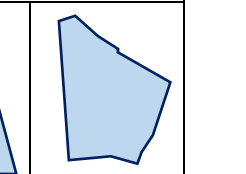
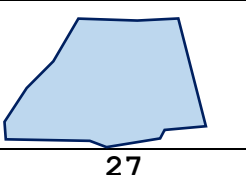
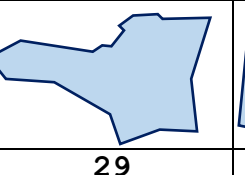
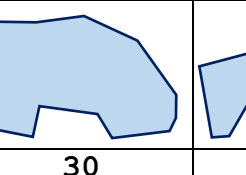
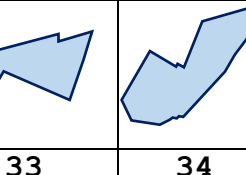
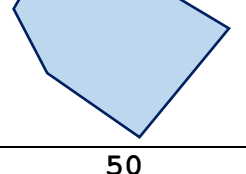
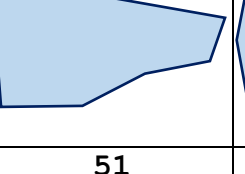
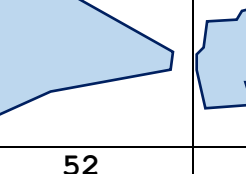
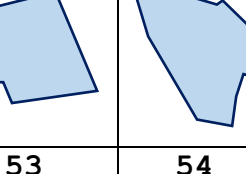
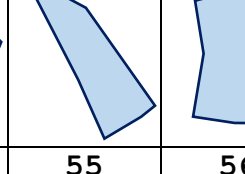
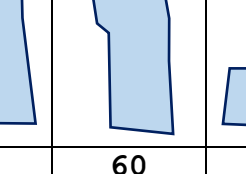
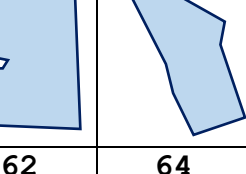
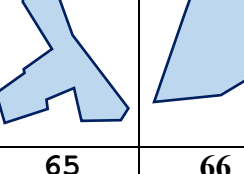
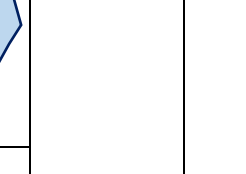
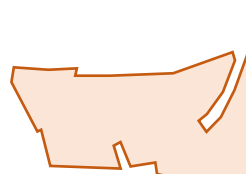
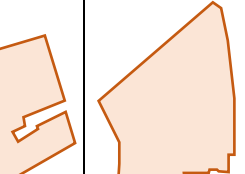
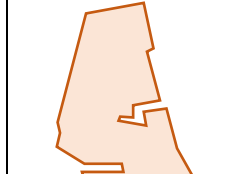
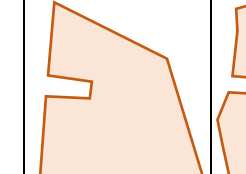
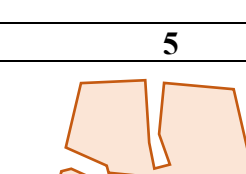
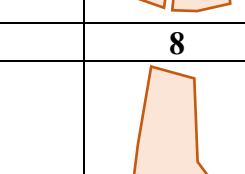
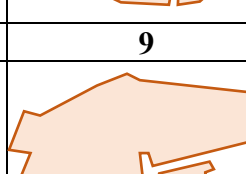
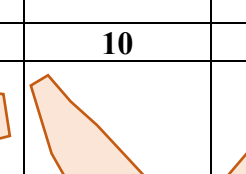
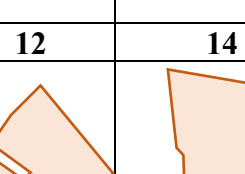
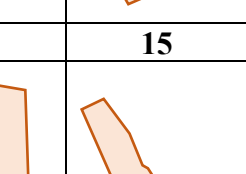
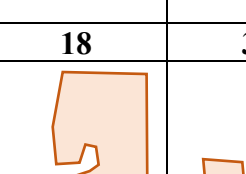
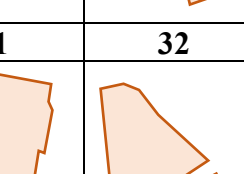
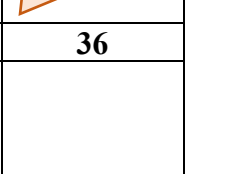
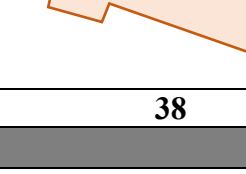
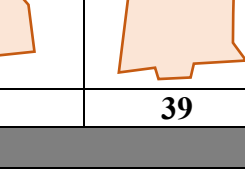
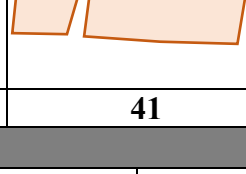
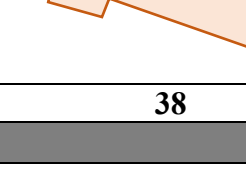
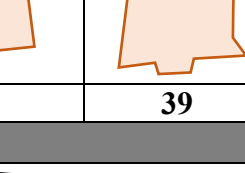
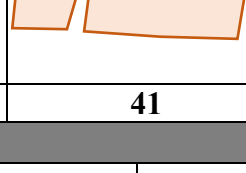
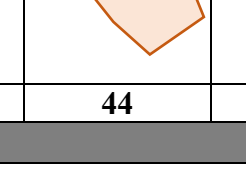
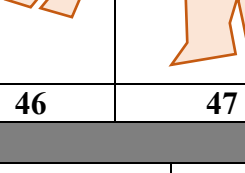
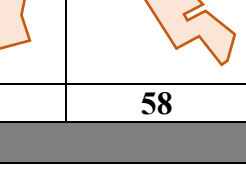
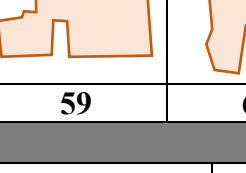
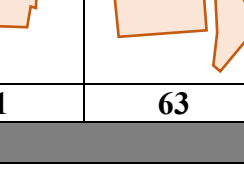
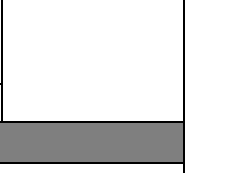
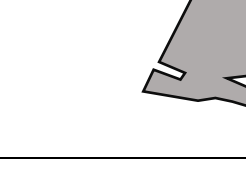
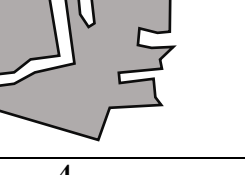
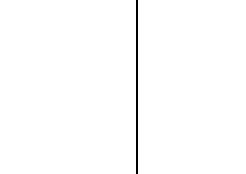
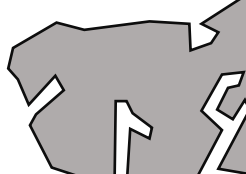
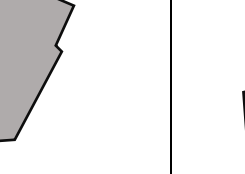
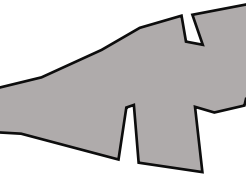
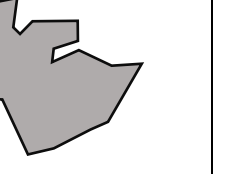
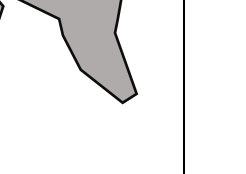
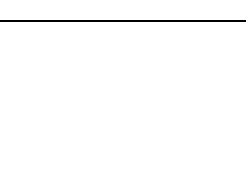
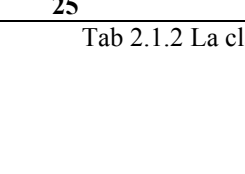
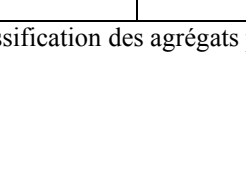
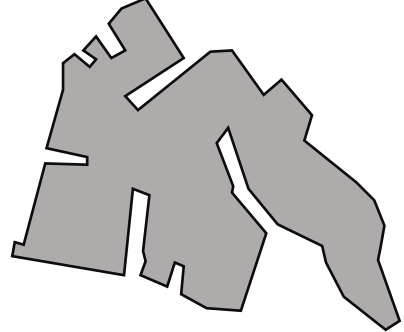


Fig 2.1.7 Répartition des agrégats selon leurs configurations (Source : auteur)

Classification d'agrégat	Taille	Nombre d'unité	Nombre d'impasse	Illustrations (Exemples)												
Compact	Petit ou moyen	De 3 à 32	0													
				1	2	3	6	11	13	16	17	20	21	22	23	26
																
				27	29	30	33	34	35	37	40	42	43	45	48	49
																
				50	51	52	53	54	55	56	60	62	64	65	66	
Semi-ramifié	Moyen ou Large	De 9 à 52	De 1 à 3													
				5	8	9	10	12	14	15	18	31	32	36		
																
				38	39	41	44	46	47	58	59	61	63			
Ramifié	Large ou très large	De 36 à 74	De 4 à 7													
				4	7	19										
																
				25	28	57										

Tab 2.1.2 La classification des agrégats par taille et nombre d'impasses (Source : auteur)

2.2 Sélection du cas d'étude

2.2.1 Introduction

La sélection d'un cas d'étude représentatif de la Casbah d'Alger est une tâche difficile en raison de la complexité morphologique de la médina d'une part et de ses grandes dimensions d'autre part. Pour cette raison, les critères de sélection reposent sur trois aspects fondamentaux, à savoir :

1. Les résultats et constats obtenus de l'analyse urbaine ;
2. L'applicabilité du processus méthodologique ;
3. L'atteinte des objectifs de la recherche dans le temps alloué.

2.2.2 Critères de sélection

Les critères de sélection sont groupés et présentés dans le **Tab 2.2.1**.

Le critère	La description	Le choix
1 Représentativité	L'agréat doit être suffisamment représentatif du tissu urbain pour que la recherche puisse être extrapolée.	Le sous-secteur sauvegardé 1 (règlement final du PPSMVSS) englobant la partie haute de la Casbah (Fig 2.1.1) et (Fig 2.1.3).
2 Authenticité	L'agréat doit être doté du maximum degré d'authenticité possible en incluant le maximum d'unités architecturales traditionnelles authentiques.	L'agréat doit comprendre un pourcentage minimum de 70% de typologies architecturales traditionnelles authentiques.
3 Typologies architecturales	L'agréat doit respecter la répartition typologique des maisons les plus communes de la Casbah.	L'agréat doit inclure principalement au moins 50% de la typologie dominante, à savoir la maison à patio, suivie d'une typologie de maison à <i>Chebbek</i> . La typologie des maisons <i>Aloui</i> peut être incluse mais représentant le pourcentage le plus bas.
4 Accessibilité	L'agréat doit être facilement accessible pour la réalisation de travail in situ relatif aux relevés techniques. Obtention des autorisations officielles des autorités concernées (ANSS ¹¹ et MC ¹²) ainsi que l'approbation des propriétaires des maisons. (Annex A1).	L'agréat ne présentant pas de risque d'effondrement et pour lequel l'accès est disponible pour les propriétaires des maisons.

¹¹ Agence Nationale des Secteurs Sauvegardés située à Dar EL-Kadi (la basse Casbah) avec pour mission la sauvegarde, la gestion et la promotion des sites historiques.

¹² Ministère de la Culture, Direction de la protection juridique des biens culturels et de la valorisation du patrimoine culturel avec pour mission la protection du patrimoine national.

5 Faisabilité	La taille de l'agrégat doit être raisonnablement gérable pour la réalisation des relevés techniques en premier lieu ainsi que le traitement des données et leur exploitation en second lieu.	Petits agrégats de catégorie «compacts» avec un maximum de 5 à 6 unités agrégées.
6 Moyens	La sélection de l'agrégat représentatif doit garantir l'applicabilité du processus méthodologique en considérant : (1) la disponibilité des équipements (scanner laser 3D, workstation, etc.) et (2) le temps nécessaire pour achever la recherche doctorale.	/

Tab 2.2.1 Critères de sélection du cas d'étude (Source : auteur)

2.2.3 Présentation du cas d'étude

Sur la base des critères présentés dans le [Tab 2.1.1](#), la sélection du cas d'étude est effectuée par processus d'élimination comme le montre la [Fig 2.2.1](#).

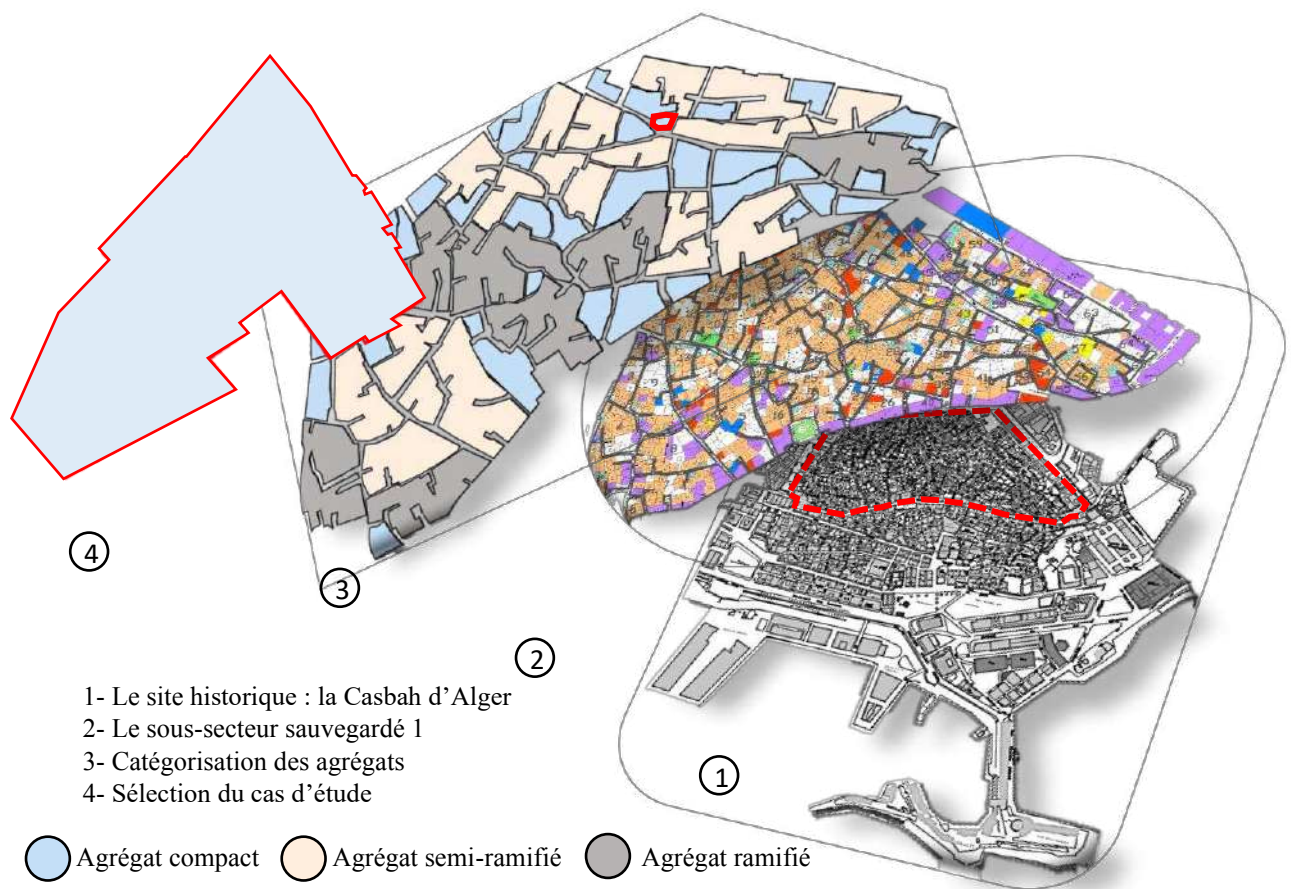


Fig 2.2.1 Sélection du cas d'étude (Source : auteur)

L'agrégat sélectionné pour mener cette recherche fait partie du Sous-secteur sauvegardé 01 de la Casbah d'Alger portant le code 35 comme numéro d'identification (Fig 2.1.3). Il est situé entre les rues «Kadi Said» et «Bouderies père et fils». Il est composé de cinq maisons traditionnelles dont trois appartiennent aux maisons de typologie architecturale à patio «*Wast Ed-Dar*» (patio) tandis que les deux autres appartiennent à la maison de typologie architecturale «*Chebbek*» (puit de lumière) (Fig 2.2.2). L'agrégat est entouré le long de son périmètre par quatre ruelles étroites Fig 2.2.3 d'une superficie d'environ 317m², c'est l'un des 5 plus petits agrégats de la Casbah d'Alger. Il fait partie de l'agrégat de la catégorie « compact ». Son détachement des autres macrostructures lui confère une indépendance structurelle.

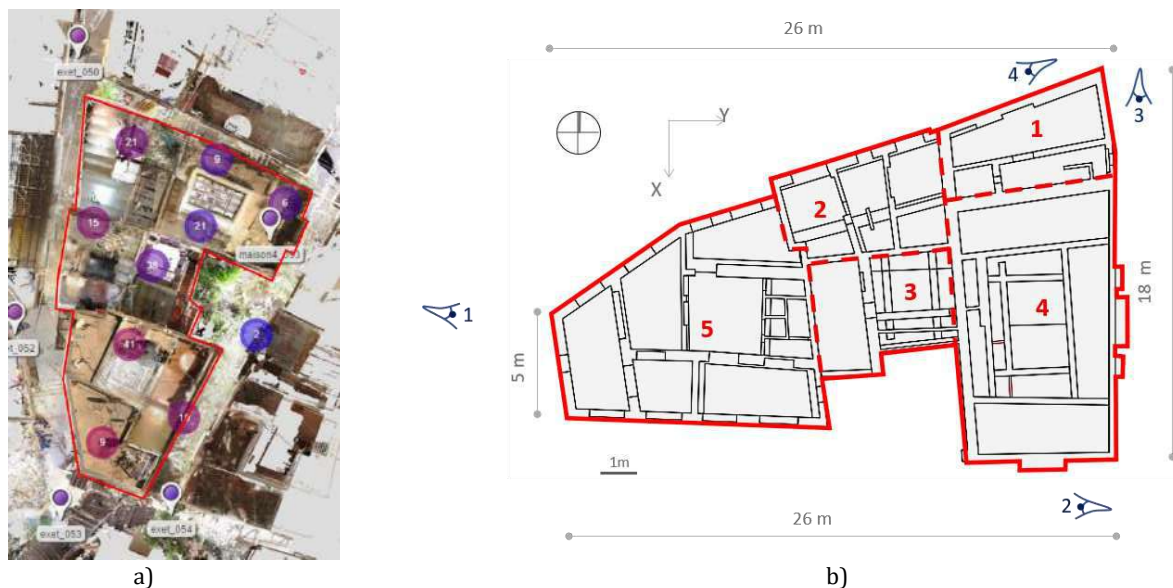


Fig 2.2.2 a) Aperçu Général de l'agrégat obtenu grâce au "Scene WebShare Cloud",
b) planimétrie montrant la délimitation des maisons et le positionnement des vues des différentes allées
(Source: auteur)



Fig 2.2.3 Différentes vues des ruelles entourant l'agrégat (Source : auteur)

Les maisons sont situées sur un terrain en pente avec un dénivelé d'environ 8m. Elles sont réparties sur une hauteur totale variant de 5 m pour la maison la plus basse à 10 m pour la plus haute. Les deux patios (3^{ème} et 4^{ème} maisons) sont entourés de galeries et composés d'arcs brisés outrepassés (en ogive en fer à cheval) soutenus par des colonnes torsadées Fig 2.2.4 a. Dans la plupart des cas, les murs porteurs sont équipés de niches décoratives et / ou fonctionnelles (espaces

de rangement) avec des arcs en anse de panier : arc typique et spécifique des maisons de la Casbah d'Alger **Fig 2.2.4 b/c**. Une fiche technique du cas d'étude est présentée dans le **Tab 2.2.2**.

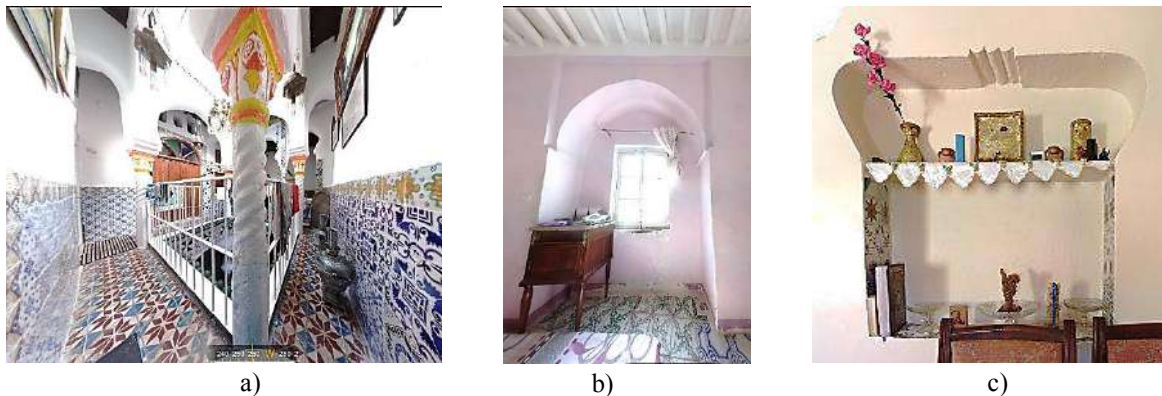


Fig 2.2.4 a) La galerie entourant le patio de la 3^e maison, composée d'arcs brisés outrepassés (en ogive en fer à cheval) et soutenue par des colonnes torsadées, b) les niches murales : arc brisé, c) les niches murales : arc en anse de panier (Source : auteur).

Fiche technique

Description

Cas d'étude : Agrégat

Nombre de maisons : 5

3 maisons à patio

2 maisons avec *Chebbek*

Global dimensions :

12 m X 16.65m

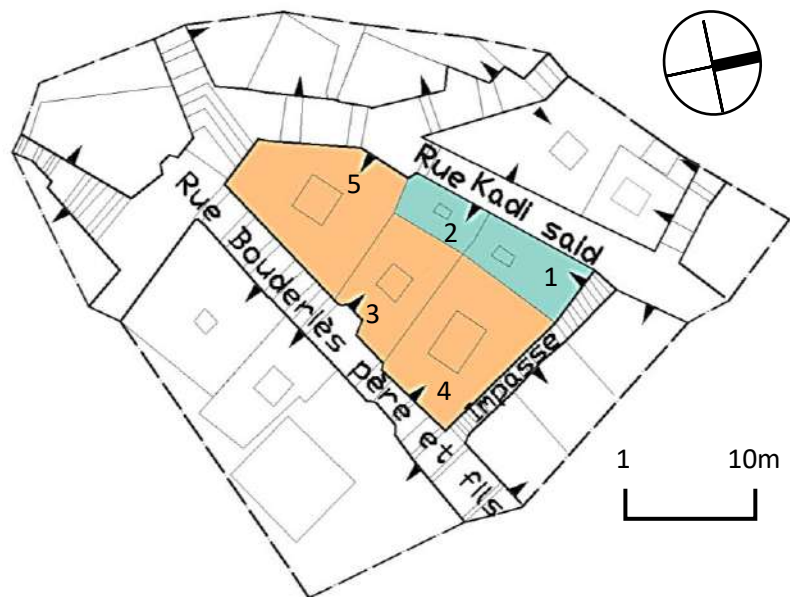
Surface : $\approx 317 \text{ m}^2$

Périphérie : $\approx 77 \text{ m}$

Dénivelé : $\approx 8\text{m}$

Macrostructure
structurellement
indépendante

Illustrations



Satisfaction des critères de sélection					
Représentativité	Authenticité	Typologies Architecturales	Accessibilité	Faisabilité	Moyens
Sous-secteur 1	Typologies architecturales authentiques à 100%	60% Maison à patio, 40% Maison avec <i>Chebbek</i>	Autorisations obtenues (Annex A.1)	Agrégat appartenant à la catégorie « compact »	Disponible
Satisfait	Satisfait	Satisfait	Satisfait	Satisfait	Satisfait

Tab 2.2.2 Fiche technique du cas d'étude (Source : auteur)

2.3 Relevés techniques

2.3.1 Introduction

L'intervention sur l'Architecture Vernaculaire est très complexe en raison surtout du caractère irrégulier de l'architecture et de l'organicité du tissu urbain. Cependant, la réalisation d'un relevé architectural suivi d'une modélisation 3D est une étape essentielle dont la principale difficulté est la représentation correcte et précise de formes géométriques complexes imbriquées et irrégulières. Pour cette raison, il est recommandé de respecter un processus spécifique qui permet d'obtenir un haut degré de précision du modèle 3D final.

L'introduction de la numérisation 3D dans le monde des bâtiments patrimoniaux a profondément révolutionné toutes les procédures d'arpentage, de modélisation et d'analyse. En effet, l'utilisation de nouveaux outils et techniques de scan 3D tels que SLAM, le scanner laser 3D, le drone ... et bien d'autres technologies, permet aujourd'hui non seulement de gagner un temps considérable lors du relevé architectural, mais surtout la numérisation de tous les détails architecturaux, structurels et environnementaux. L'exploitation du nuage de points obtenu par la numérisation 3D permet d'effectuer plusieurs types d'analyses dans différents domaines (ingénierie structurelle, conception architecturale, archéologie du bâtiment...).

Nous proposons dans ce chapitre une application sans précédent du scanner laser 3D sur un agrégat entier.

2.3.2 Relevé architectural par laser scanner 3D

2.3.2.1 Méthodologie de l'investigation in-situ

La particularité architecturale et typologique des maisons de la Casbah d'Alger ainsi que la configuration structurelle de l'agrégat nécessitent une numérisation détaillée, d'où la nécessité d'utiliser le Scanner Laser FARO 360. La numérisation de l'ensemble de l'agrégat a nécessité 188 numérisations en couleur, avec une résolution optimale de 3600 points par cm² et une précision de ± 1 mm.

Une stratégie opérationnelle est mise en place en amont avant de démarrer la numérisation 3D de l'agrégat.

Les maisons ont été numérotées de 1 à 5 selon la disponibilité des propriétaires. Chaque maison est scannée à partir du niveau supérieur jusqu'aux niveaux inférieurs en respectant le même sens de rotation. L'ensemble de l'agrégat a été scanné en tenant compte des niches, des entrelacements ainsi que les détails architectoniques et structurels. Une fois au rez-de-chaussée, une station est prévue à l'entrée de chaque maison qui sera reliée à la numérisation extérieure de l'agrégat (**Fig 2.3.1**). Cette procédure présente un triple avantage : 1) il permet de gagner un temps considérable lors de relevé in-situ, 2) il assure une numérisation complète de l'agrégat et 3) il facilite considérablement l'assemblage des différents scans.

Un certain nombre de scans ont été réalisés sur les terrasses supérieures des maisons environnantes pour compléter la numérisation des toits et des façades

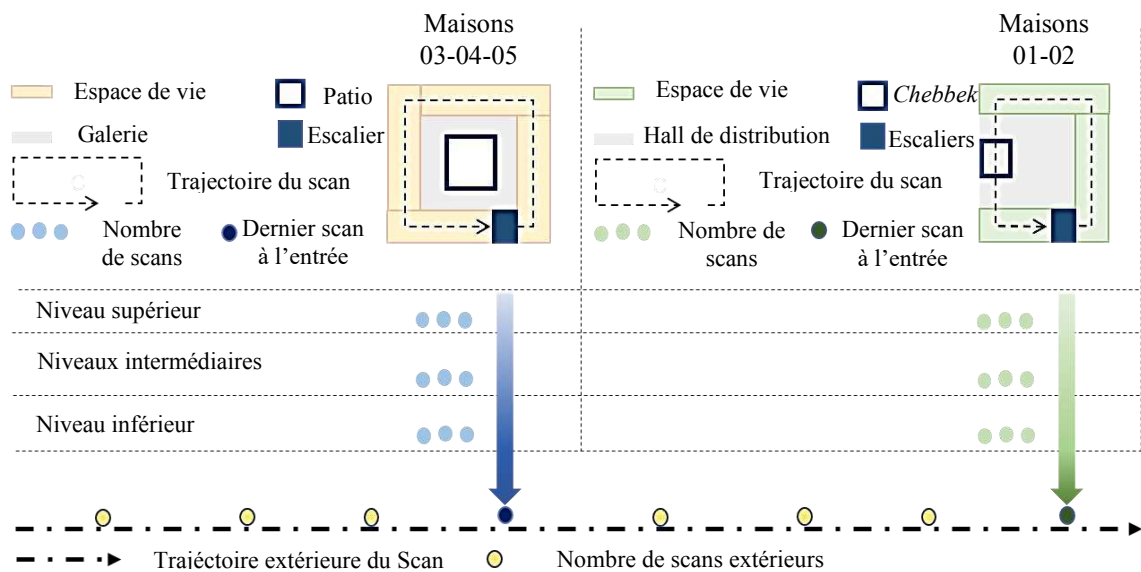


Fig 2.3.1 Schématisation de la stratégie opérationnelle établie lors de la numérisation de l'agrégal (Source : auteur).

2.3.2.2 Assemblage des nuages de points

Le relevé par laser scanner 3D a été réalisée en 05 jours (environ 60 heures de temps de numérisation) permettant l'obtention de 188 scans (Fig 2.3.2).



Fig 2.3.2 Différents scans après nettoyage et avant assemblage, un exemple de 24 scans (Source : auteur).

Tous les scans appartenant à la même maison ainsi que ceux de l'extérieur ont été nettoyés et assemblés dans le programme Recap d'Autodesk. Le nettoyage consiste à supprimer tous les points ne représentant aucun un intérêt particulier au projet tels que les passants et l'environnement immédiat (maisons adjacentes, végétation ...), ce qui permet d'améliorer la visibilité du projet et réduire la taille du scan. Enfin, afin d'assembler les différentes numérisations, nous utilisons le programme Autodesk Recap qui permet d'abord d'importer les différents scans appartenant à la même maison. Une fois l'importation établie, les scans sont assemblés deux par deux en sélectionnant à chaque fois trois points de référence en commun. Le logiciel affichera dès lors le résultat de l'assemblage, dont la précision est améliorée grâce aux algorithmes contenus dans le programme.

La qualité de l'assemblage est indiquée à l'aide du diagramme de secteur affiché sur la fenêtre d'assemblage désignant les trois paramètres suivants : (1) le nombre de points inférieur à 6 mm (la distance entre les points), (2) le recouvrement qui dépend de la résolution de la numérisation et, (3) l'équilibre du scanner qui qualifie la qualité des numérisations fusionnées. Une fois l'assemblage terminé, l'indexation est nécessaire pour retraduire les données du nuage de points. Il est cependant possible d'insérer les coordonnées topographiques (x, y, z) permettant au projet d'être correctement positionné lorsqu'il est exporté vers d'autres logiciels utilisant la géolocalisation comme Autocad ou Revit. Puisqu'il s'agit d'une Architecture Vernaculaire irrégulière et afin de garantir un assemblage précis des 188 scans, six repères sphériques sont placés de manière à être perceptibles à partir d'au moins deux balayages successifs. Nous présentons la **Fig 2.3.3** pour illustrer le processus d'assemblage dont la durée totale est estimée à 14 jours avec un travail moyen de 8 heures par jour.

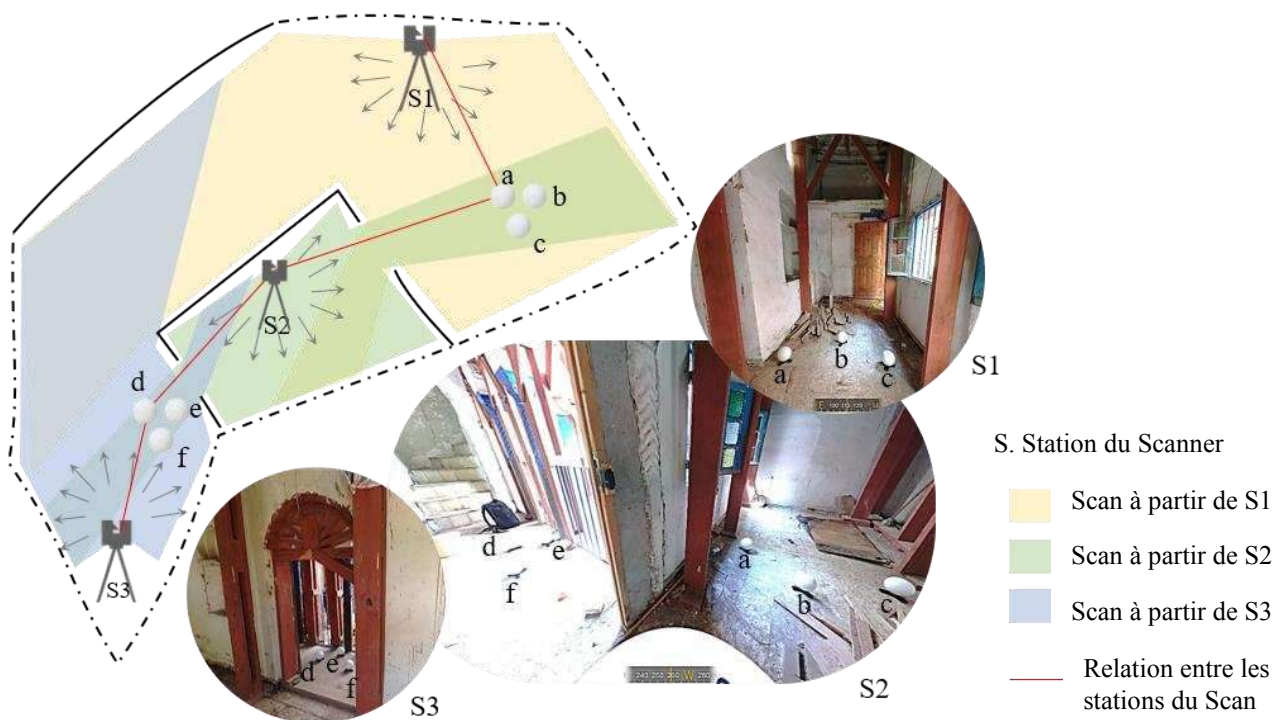


Fig 2.3.3 Processus d'assemblage des différents scans (Source : auteur).

Les six formats RCP obtenus (les 5 maisons + l'extérieur) sont assemblés en un seul nuage de point à l'aide du programme Scene (**Fig 2.3.4**). Ce dernier a permis une meilleure gestion du fichier final, dont la taille est de 130 GB.



Fig 2.3.4 Nuage de points final de l'agrégat obtenu après nettoyage et assemblage. (Source : auteur).

2.3.3 Relevé photographique par caméra 3D

Le relevé photographique représente la deuxième étape du travail de terrain. Il s'agit de prendre une série de photographies séquencées de l'agrégat. Il est réalisé à l'aide de la caméra 3D haute résolution (360 °) incluse dans le Scanner Laser 3D et obtenu après l'obtention assemblage du nuage de points final de l'agrégat. Le relevé photographique est obtenu grâce au programme Scene qui accompagne le scanner laser Faro 360 sous la forme de « Scene WebShare Cloud ». Ce dernier présente deux avantages principaux énumérés ci-dessous :

- 1- Prise des mesures (distance, angle, inclinaison) qui seront exploitées dans la modélisation architecturale 3D (**Fig 2.3.5 a**). Il est important de noter que les maisons constituant l'agrégat sélectionné sont toujours occupées par leurs propriétaires, dont le mobilier intérieur soustrait à la vue certains détails architecturaux et structurels lors de la numérisation 3D. Aussi, le relevé photographique permet une meilleure lecture de l'espace architectural lors de la création de sections minces utiles lors du processus de modélisation architecturale (**Section 3.3**).
- 2- Constituer une source documentaire pour les maisons de la Casbah d'Alger et une référence importante lors de la réalisation des relevés de l'état de conservation (**Fig 2.3.5 b**).

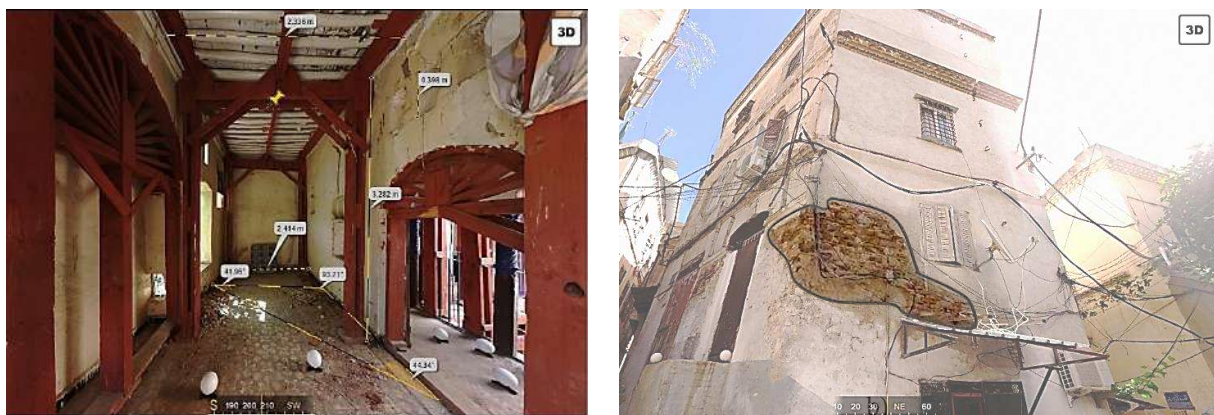


Fig 2.3.5 Relevé photographique 3D (Source: auteur)

a) Exemple d'obtention de mesures, b) exemple de pathologie (détachement du mortier de finition).

L'étude photographique 3D de l'environnement bâti est complétée par un appareil photo Canon EOS 600D.

2.3.4 Relevé de l'état de conservation

2.3.4.1 Description

L'agrégat dispose d'un bon état général de conservation. Néanmoins, diverses pathologies ont été constatées sur site de différentes natures notamment dans les maisons 1 et 4. Les désordres et anomalies sont classés en trois catégories à savoir :

a- Dommages structurels :

- Endommagement de certaines voliges de bois composant les planchers des espaces de vie (D30 **Fig 2.3.6**) ainsi que ceux des porte-à-faux (D8 et D9 **Fig 2.3.6**) provoquant ainsi une détérioration occasionnelle des planchers (maisons 2 et 4).
- Effondrement partiel de certains planchers appartenant aux maisons 1 et 2 (D20, D21, D23, D24, **Fig 2.3.6**)

- Flexion verticale sévère de la façade nord de la maison 1 (D11, [Fig 2.3.6](#)).

b- Dégradations anthropiques :

- Interventions de réparation non conformes telles que l'application de mortier de finition à base de ciment (D6, [Fig 2.3.6](#)). L'installation de certains équipements tels que les climatiseurs ou les compteurs d'eau provoquant ainsi des endommagements ponctuels des murs (trous non réparés) (D9, [Fig 2.3.6](#)).

- Apparition de nouveaux espaces à l'époque coloniale et post-coloniale sur des toits non conformes à la réglementation en vigueur (D15, D18, D23 [Fig 2.3.6](#)). Plus de détails sont fournis dans la section réservée à l'analyse de stratification architecturale de l'agrégat ([Section 3.4](#)).

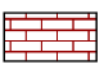
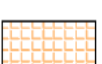
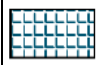
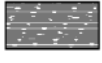
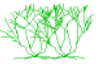
c- Dégradations des matériaux :

- Disparition des mortiers de finition révélant les murs appareillés (maison 5 notamment) (D5, [Fig 2.3.6](#)).

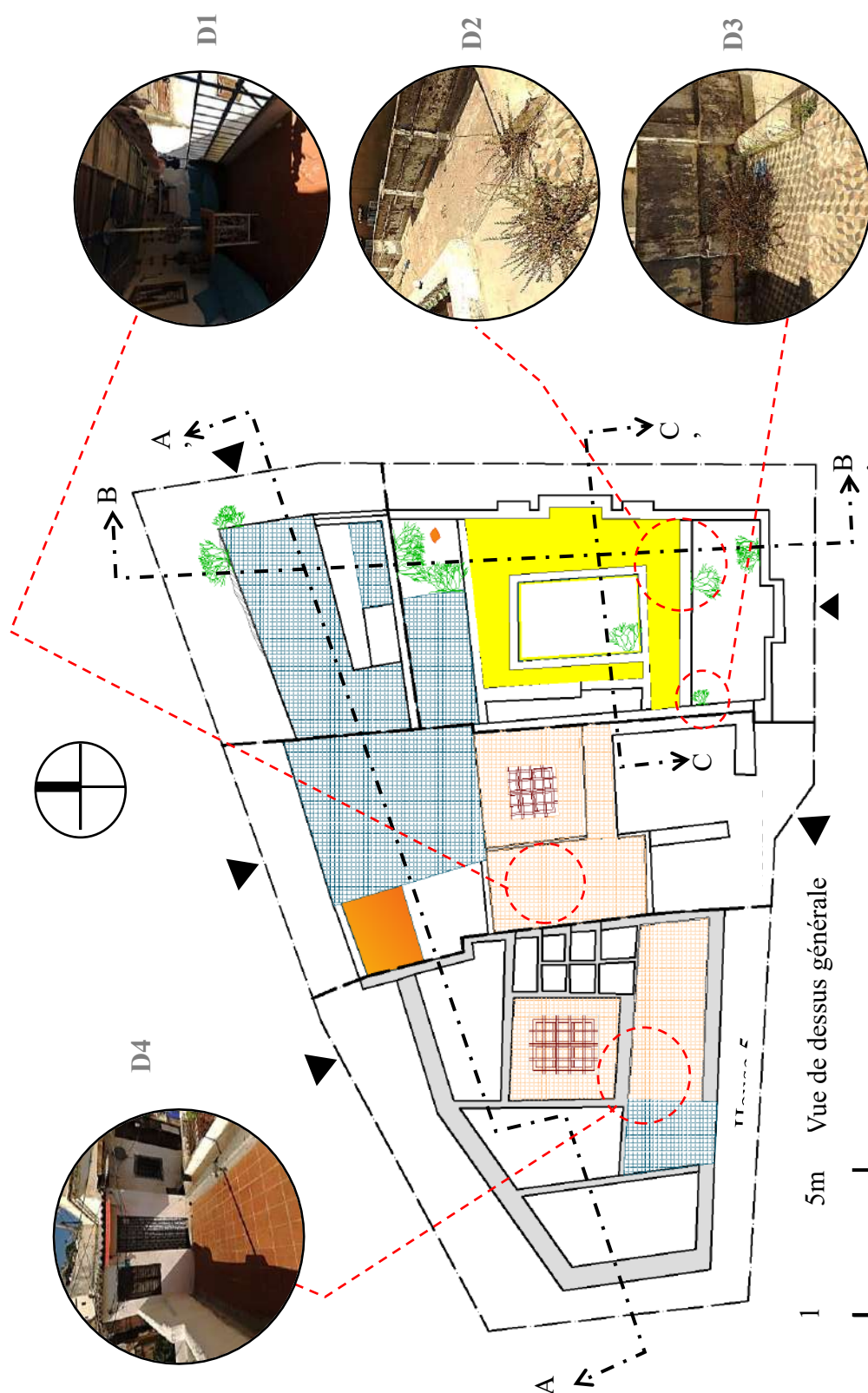
- L'apparition de petites fissures éparses (D10, [Fig 2.3.6](#)), la présence d'humidité et d'infiltrations d'eau en particulier dans la maison 1 (D22, [Fig 2.3.6](#)) ainsi que la végétation (maisons 1 et 4) (D12, D32, [Fig 2.3.6](#)).

2.3.4.2 Présentation du relevé technique

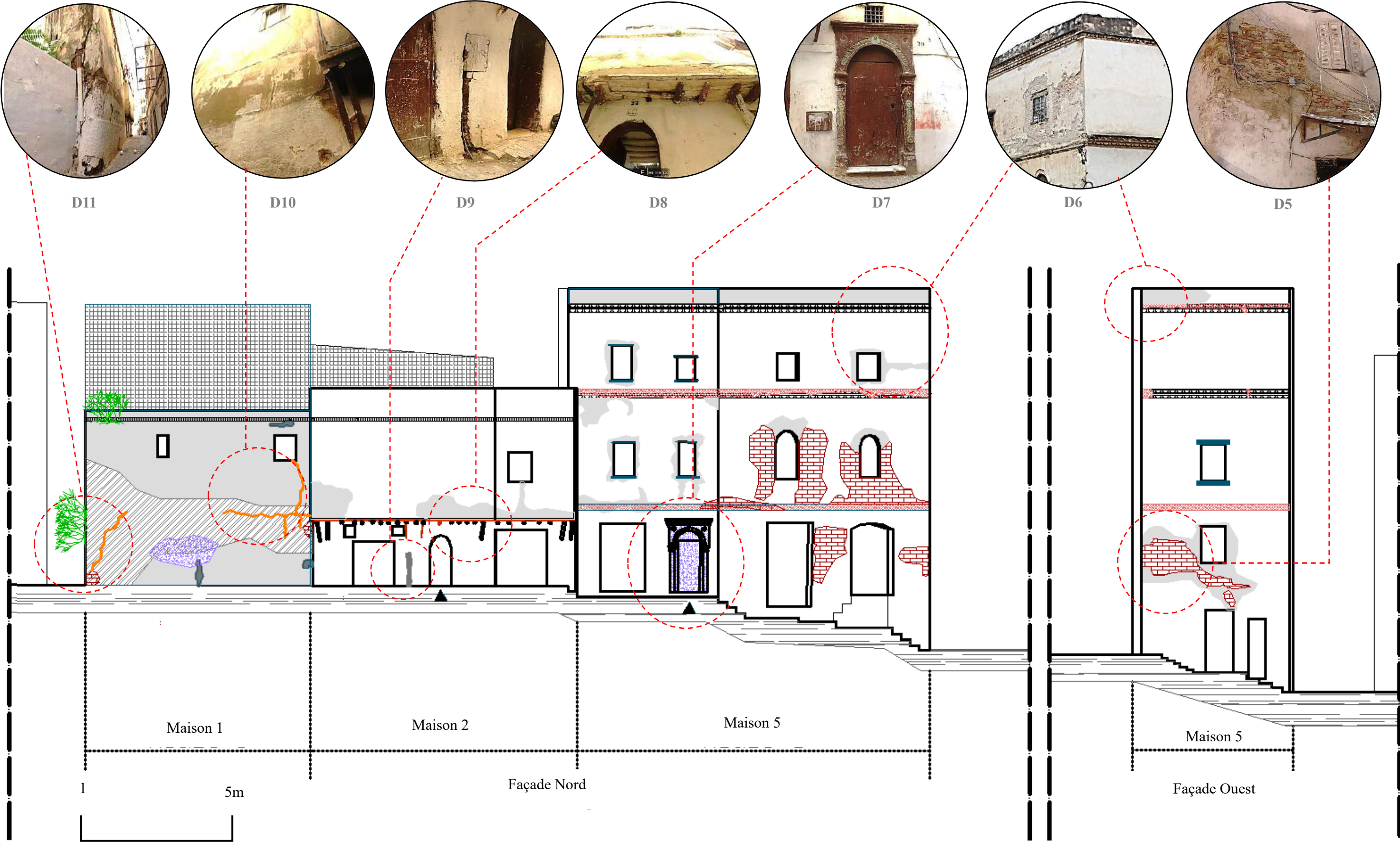
Nous présentons dans cette section un relevé technique complet de l'état de conservation de l'agrégat composé de 5 panneaux en appliquant la légende présentée dans le [Tab 2.3.1](#).

	Manque d'élément en bois		Absence du mortier de finition		Absence de tuile/faïence		Endommagement léger du plancher
	Effondrement partiel du plancher		Manque d'éléments architectoniques		Faïence récente		Flexion verticale
	Rajouts récents		Pathologies liées au bois		Peinture opaque		Présence d'algue
	Mortier de ciment		Mur perforé		Humidité		Matériau récent
	Petite végétation		Grande végétation		Petite fissure		Large fissure
	Infiltration		Entrée				

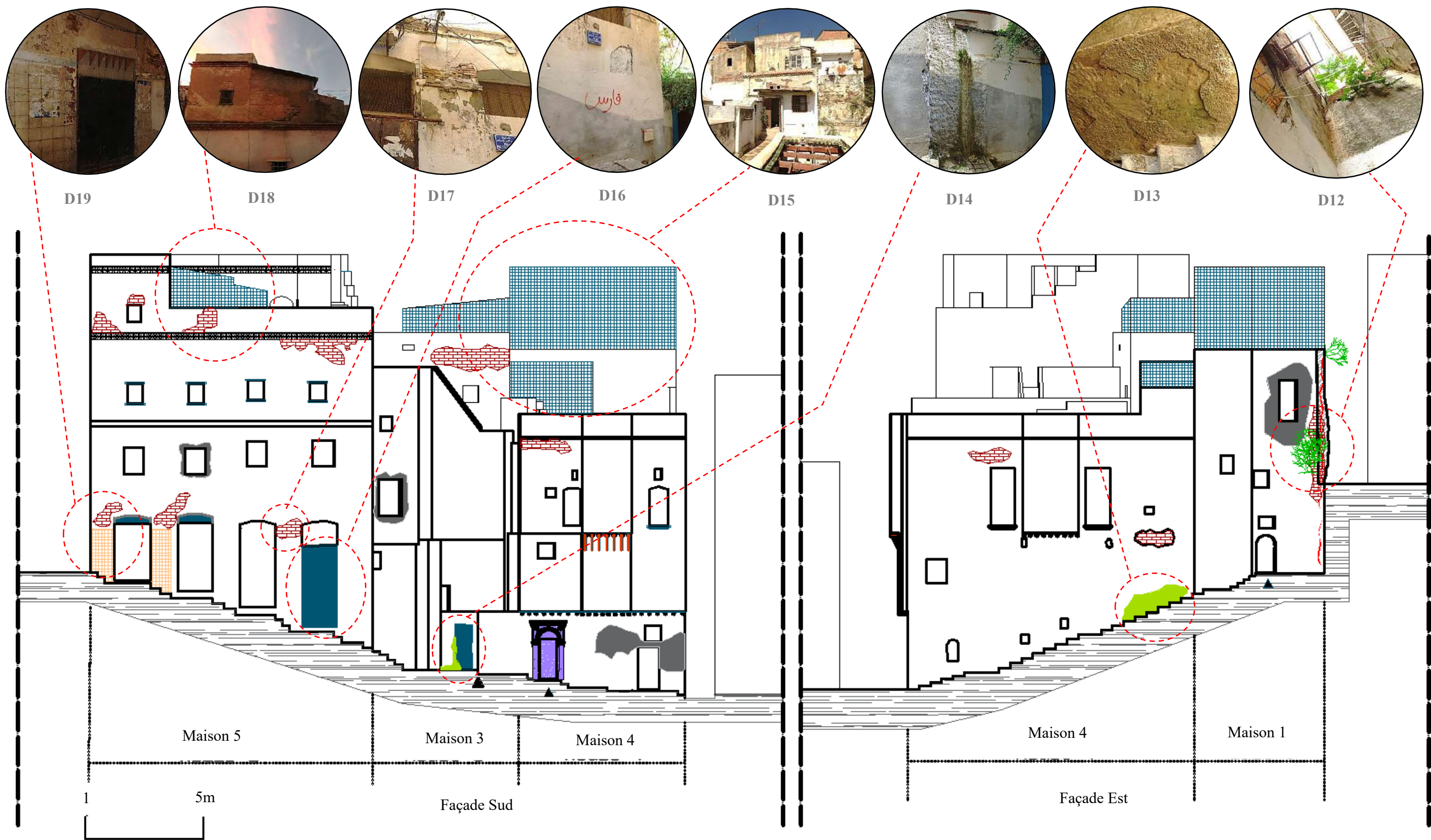
Tab 2.3.1 Légende du relevé de l'état de conservation (Source : auteur).



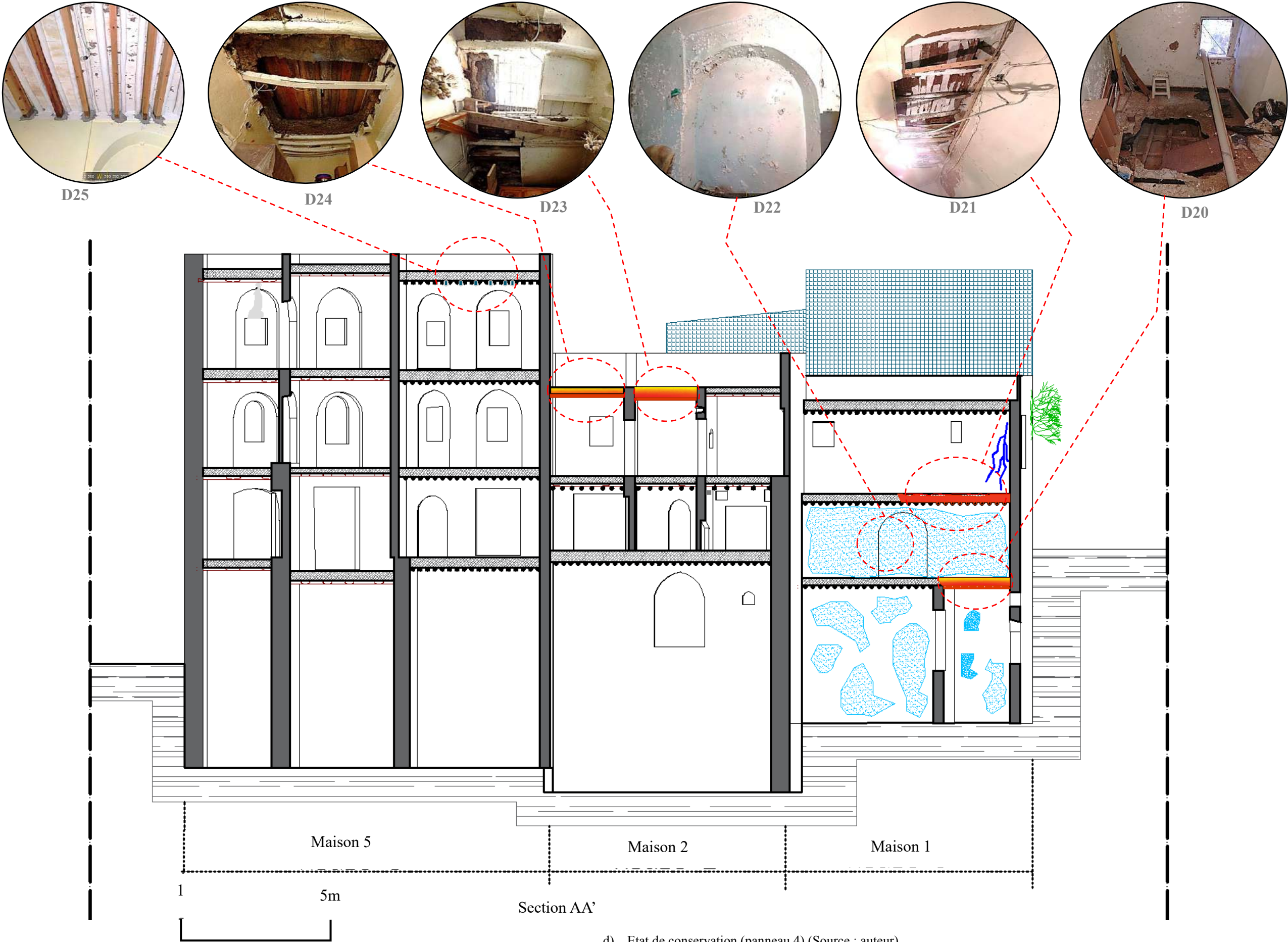
a) Etat de conservation (panneau 1) (Source: auteur).



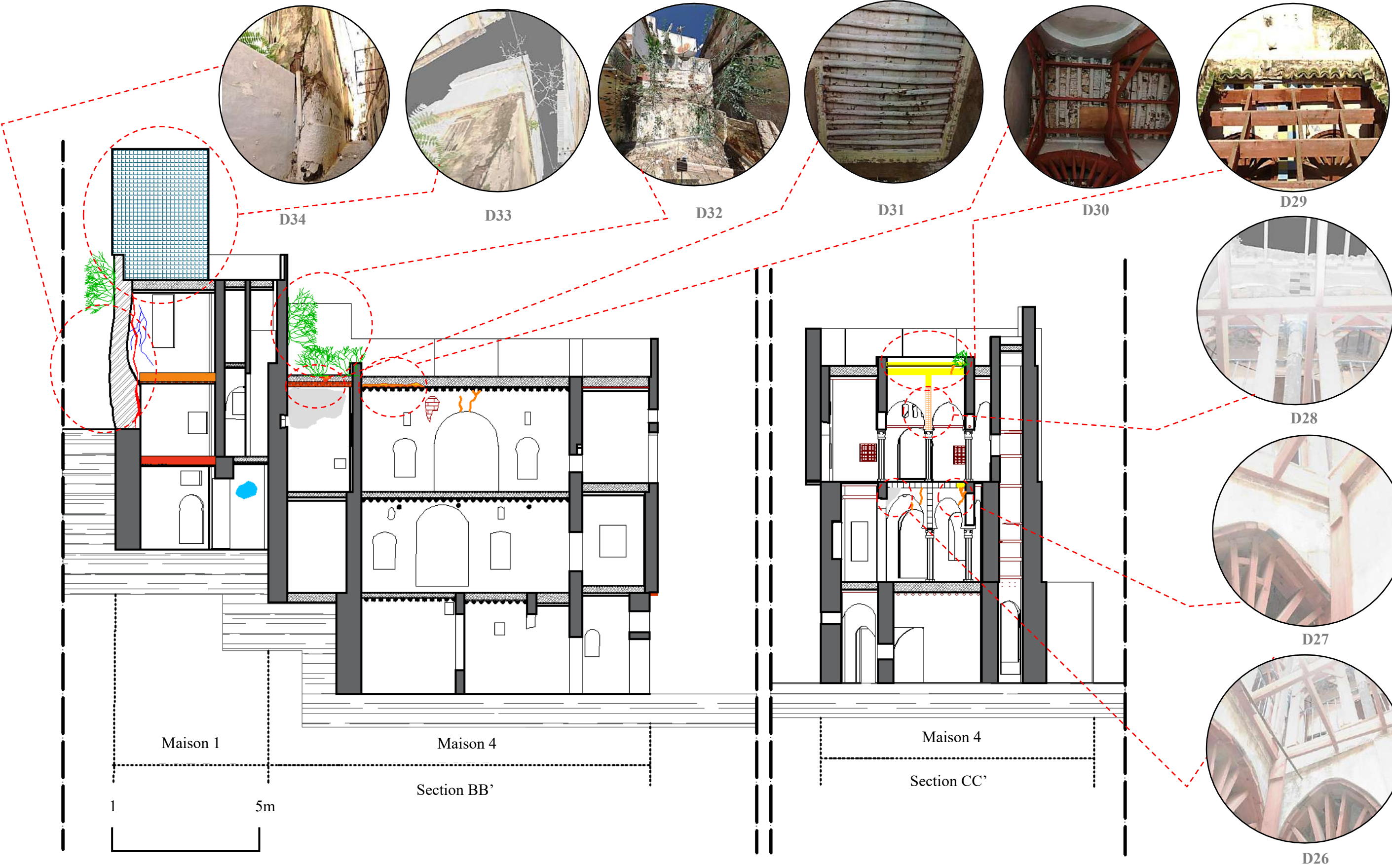
b) Etat de conservation (panneau 2) (Source : auteur).



b) Etat de conservation (panneau 3) (Source : auteur)
c)



d) Etat de conservation (panneau 4) (Source : auteur).



e) Etat de conservation (panneau 5) (Source : auteur).
Fig 2.3.6 Relevé de l'état de conservation (Source : auteur).

2.4 Prélèvement des échantillons

2.4.1 Présentation du site de prélèvement

La caractérisation des matériaux de construction en termes de propriétés mécaniques et physico-chimiques est nécessaire pour la FEA ainsi que l'analyse de la stratification architecturale. En effet, la collecte d'informations historiques, des données constructives et des propriétés des matériaux de construction seront incluses dans les deux modèles numériques (architectural et structurel) obtenus à la fin du processus de modélisation 3D par le moyen du logiciel de paramétrage BIM (**Section 3.3**).

On distingue principalement trois types de matériaux utilisés dans la construction de l'agrégat : (1) les murs porteurs en maçonnerie en briques pleines en terre cuite assemblés avec un mortier de chaux et d'argile, (2) les rondins de « *Thuja* » composant les planchers sous forme de solives, (3) le tuf pour les colonnes supportant les galeries et entourant les patios.

Les échantillons de matériaux sont prélevés à partir d'une maison traditionnelle avec patio partiellement effondrée dans son axe médian (**Fig 2.4.1**) suite à de multiples autorisations de l'ANSS ainsi que du MC (**Annexe A1**). Il est important de souligner que le site d'échantillonnage (maison à patio) fait partie du tissu urbain traditionnel et homogène de la Casbah d'Alger, à savoir le Sous-secteur 01 (USS1) auquel appartient l'agrégat numéro 43 (**Fig 2.1.3**).

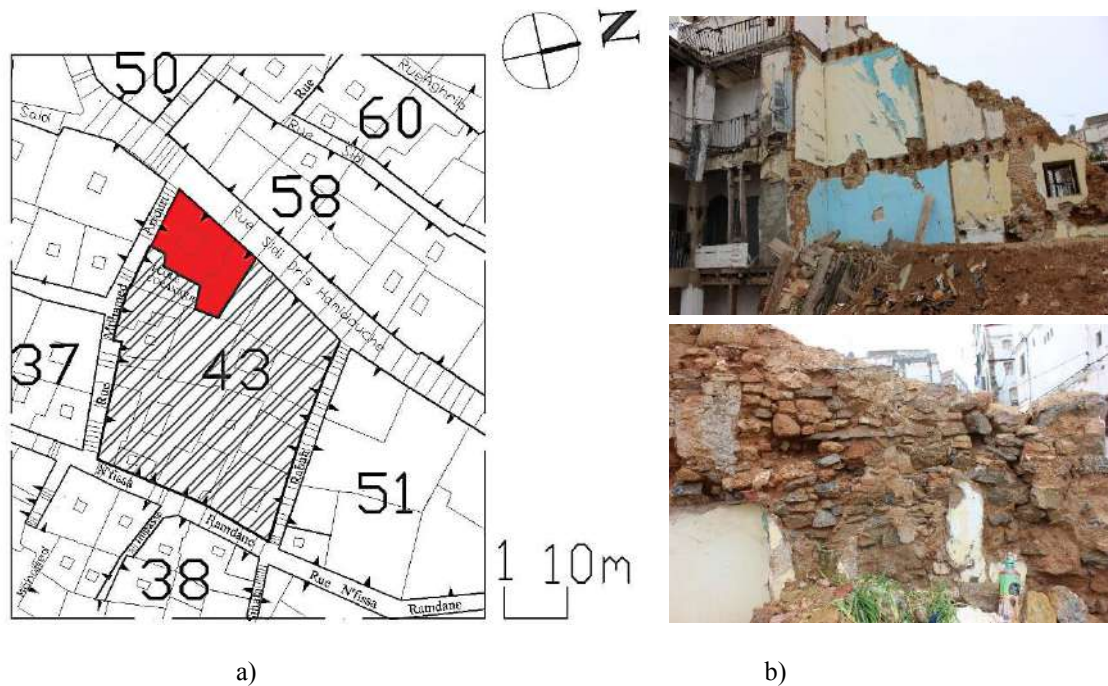


Fig 2.4.1 a) Maison effondrée en rouge (Casbah d'Alger), b) localisation des échantillons (briques) (Source : auteur)

2.4.2 Description des échantillons

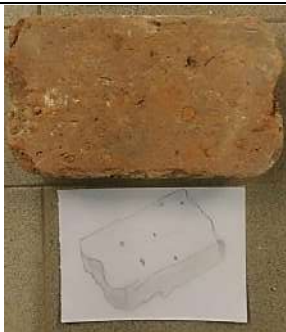
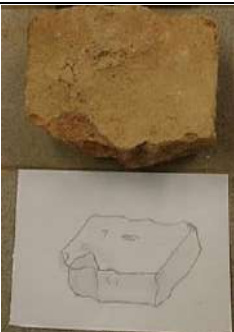
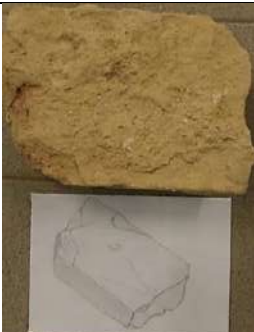
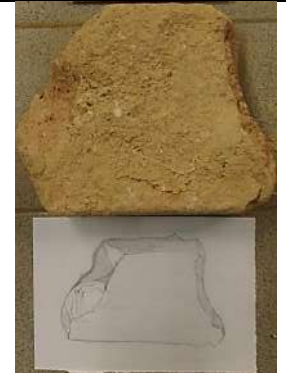
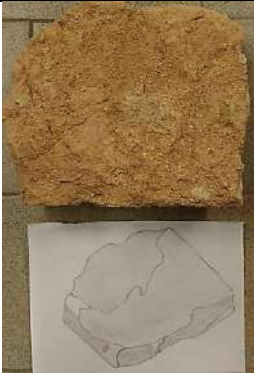
Le nombre total de briques extraites est de six dont l'épaisseur (e) varie entre 33 et 43 mm. La longueur est comprise entre 130 et 200 mm tandis que la largeur varie de 100 à 130 mm. Les dimensions des briques échantillonnées (L) et (l) ne correspondent pas parfaitement aux dimensions mentionnées dans la littérature (Chergui, 2007) et (Abdessamed Foufa, 2007), car seules les briques fragmentées étaient autorisées pour l'échantillonnage. Les matériaux intacts sont destinés au réemploi dans les projets de restauration.

Les échantillons de *Thuja* sont au nombre de trois et représentent trois états différents de conservation : (1) intact, (2) semi-dégradé et (3) dégradé. Cette classification est réalisée sur la base d'une analyse visuelle in-situ. Cela permettra de comparer les résultats obtenus concernant les trois états de conservation du bois. La longueur des rondins varie de 610 à 660 mm, avec un diamètre variable (D) de 60 à 100 mm. Toutes les dimensions mentionnées dans (**Tab 2.4.1**) sont en (mm) et sont prises à l'état d'échantillonnage.

L'analyse visuelle des échantillons a révélé des différences chromatiques entre les briques variant d'un ocre rouge, d'un jaune sableux à un ocre brun.

La différence de couleurs peut être liée à l'utilisation d'argiles différentes, au mode de cuisson et à la température, ou à la position des briques dans les étuves lors de la cuisson.

La composition fibreuse des rondins de *Thuja* varie d'une composition presque parallèle à l'axe longitudinal (**Tab 2.4.1 g**), à une composition irrégulière et tordue (**Tab 2.4.1 h/i**). On note également la présence de plusieurs nœuds dont les diamètres varient de 10 à 45 mm notamment pour l'échantillon endommagé (**Tab.1 i**). Nous présentons dans le **Tab 2.4.1** les échantillons extraits ainsi que leurs principales caractéristiques (dimensionnelles, chromatiques, pathologiques et texturales).

Briques				Couleur BR1: ocre rouge BR2: ocre brun BR3: jaune sableux BR4: ocre brun BR5: jaune sableux BR6: ocre rouge
	a) Brique (BR) 1  L= 200 l= 100 e= 43	b) Brique (BR) 2  L= 130 l=100 e= 40	c) Brique (BR) 3  L= 180 L= 130 e= 35	
				Texture  Régulier et lisse / absence de mortier ou d'impureté surfacique  Rugosité régulière / présence d'une couche fine de mortier.  Rugosité irrégulière / présence de mortier et d'impureté surfaciques
	d) Brique (BR) 4  L= 170 l= 130 e= 35	e) Brique (BR) 5  L= 175 l=120 e= 33	f) Brique (BR) 6  L= 150 l= 110 e= 38	

Fragment de mur				
	Fragment de mur  L= 400 L= 250 e= 350			
Bois de <i>Thuja</i>				Description/ Pathologie  Fibres torsadées  Fibres parallèles  Présence de  Nœuds de diamètres variables  Présence de nœuds de diamètres similaires  Fissure superficielle  Présence de trous  Extrémité intacte  Extrémité moisie  Axe longitudinal droit  Axe longitudinal ondulé
	g) <i>Thuja</i> (TH) 1 : intact    L= 660 Ø: from 68 to 84	h) <i>Thuja</i> (TH) 2 : semi-endomagé       L= 610 Ø: from 56 to 66	i) <i>Thuja</i> (TH) 3 : endomagé       L= 610 Ø: from 62 to 98	

Tab 2.4.1 Présentation des échantillons à l'état de prélèvement (dimensions en mm) (Source : auteur).

2.5 Conclusion

Représentant la cité médiévale et le noyau historique de la Capitale, la Casbah d'Alger se caractérise par son tissu urbain organique et labyrinthique. La principale difficulté et le défi présentés dans ce chapitre étaient liés à la sélection du cas d'étude qui puisse être à la fois représentatif du tissu traditionnel mais aussi accessible dont la taille est gérable.

Tout d'abord, nous avons réalisé une analyse urbaine horizontale sur l'ancienne médina qui a pu mettre en évidence trois grandes catégories d'agréats. L'un d'eux, nommé agrégat compact, est prédominant avec 60% du tissu traditionnel authentique, et le cas d'étude sélectionné en fait partie. Ce résultat important permet de déduire la possibilité d'extrapolation des résultats obtenus sur d'autres cas d'étude similaires. Aussi, l'analyse urbaine a pu mettre en évidence les critères de sélection du cas d'étude.

Le relevé par scanner laser 3D est réalisé sur le cas d'étude sélectionné. Cependant, c'est l'une des technologies les plus précises et avancées de la numérisation 3D de nos jours. Cet outil nécessite un certain nombre de compétences et de manèges permettant un traitement et un assemblage correct et précis des différents scans.

Nous présenterons dans le chapitre suivant le processus de modélisation architecturale de l'agréat sélectionné à partir du nuage de points obtenu lors de la numérisation 3D.

Chapitre 3

Modélisation architecturale

3.1 Introduction

La création d'un modèle architectural 3D correct et précis d'un bâtiment historique est une première étape envers sa préservation. En effet, le modèle virtuel obtenu permet non seulement de visualiser l'œuvre architecturale mais aussi d'entreprendre différentes analyses dans divers domaines dans le but de réduire sa vulnérabilité et d'assurer par conséquent sa pérennité.

La Modélisation de l'Information du Bâtiment (*Building Information Modeling*) BIM a connu une croissance rapide et fulgurante au cours des deux dernières décennies avec le développement technologique des outils numériques. Le BIM aussi appelé Digital Prototyping Technology (Azhar, et al., 2012) est plus qu'une méthode associée à un logiciel de conception et de modélisation 3D. C'est aussi un processus et une méthode de travail utilisés depuis la phase de conception jusqu'à la construction du bâtiment, y compris la gestion du projet (Bryde, et al., 2013). Le modèle numérique 3D obtenu est paramétrique qui comprend des données intelligentes et structurées relatives au bâtiment. « *Le BIM est le partage d'informations fiables tout au long de la vie d'un bâtiment ou d'une infrastructure, de sa conception à sa démolition. Le modèle numérique est une représentation numérique des caractéristiques physiques et fonctionnelles de ce bâtiment ou de ces infrastructures* » (Riedo, 2012).

Les modèles virtuels BIM qui en résultent permettent des analyses et des simulations dans différentes disciplines (gestion de projet, gestion de budget, énergie ...) menées par différents acteurs pouvant intervenir sur une seule et même maquette numérique. De plus, les modèles BIM produits par des logiciels et technologies spécifiques tels que Revit d'Autodesk ou Archicad offrent une interchangeabilité extrêmement importante entre les différents programmes grâce aux extensions et formats d'export disponibles (dwg, pts, acis, etc.) permettant ainsi d'élargir leur exploitation (simulation structurelle, réalité virtuelle ...).

Nous proposons la Fig 3.1.1 pour illustrer la principale différence entre un logiciel basé sur le BIM proposant des objets 3D paramétrés (mur porteur, fondation, fenêtre ...) et un autre de modélisation pure basé sur des entités géométriques (plan, ligne ...).

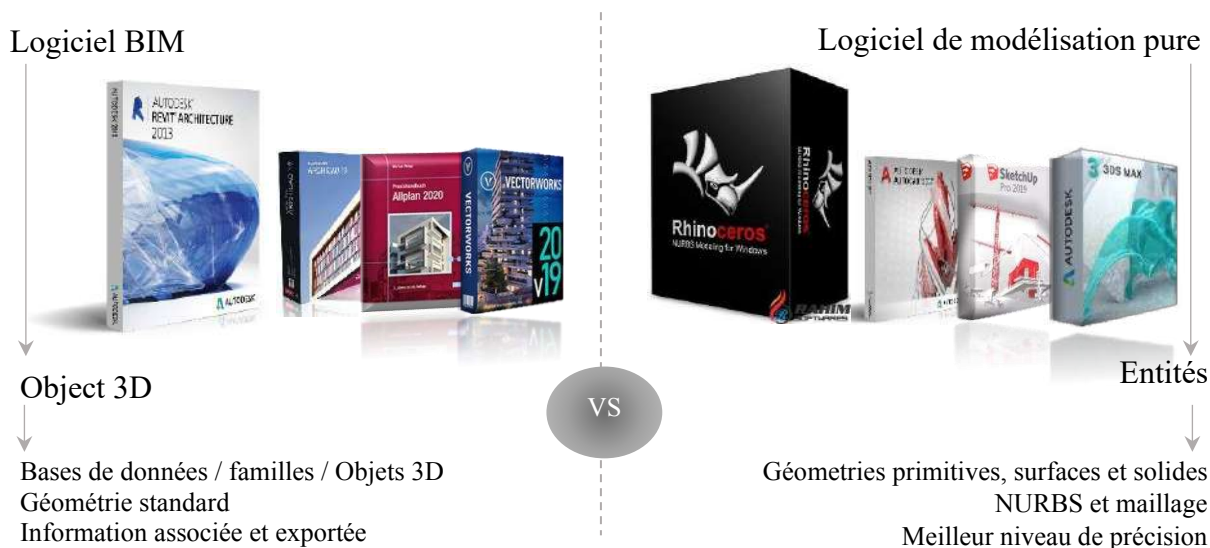


Fig 3.1.1 La différence entre les logiciels BIM et de pure modélisation (Source : auteur).

Depuis quelques années, le concept de BIM n'est plus réservé uniquement aux nouvelles conceptions, mais il est utilisé aujourd'hui comme un outil de sauvegarde, de gestion et de projection de l'environnement bâti existant. En effet, les logiciels BIM tels que Revit sont dotés de nouvelles fonctionnalités de lecture et de gestion des nuages de points obtenus à partir des appareils de numérisation tels que le Scanner Laser 3D. Cela a donné naissance à un nouveau concept apparu pour la première fois en 2009 à la suite des travaux de recherche de Maurice Murphy (Murphy, 2012), à savoir la Modélisation de l'Information des Bâtiments Historiques (*Heritage Building Information Modeling*) HBIM, particulièrement destinée au patrimoine architectural, urbain et archéologique.

Le HBIM ne permet pas uniquement la création d'un rendu 3D numérique et géométrique de l'œuvre patrimoniale, mais il offre aussi la possibilité de créer des modèles paramétriques intelligents riches en informations avec une sémantique bien définie (Peretti, 2019).

La modélisation numérique 3D du patrimoine bâti est une mission difficile à laquelle sont souvent confrontés les architectes. Cette difficulté réside dans la reproduction des formes géométriques complexes et irrégulières très courantes dans les Architectures Vernaculaires telle que la Casbah d'Alger. De plus, les outils de modélisation et les objets paramétrés disponibles dans les applications BIM sont limités et ne peuvent aller au-delà des formes géométriques parfaites et équilibrées. Il est toutefois nécessaire d'avoir recours à un autre type de logiciel basé cette fois sur les Splines à Base Rationnelle Non Uniforme (*Non-Uniforme Rational Basis Splines*) NURBS. Ces dernières sont capables de reproduire différentes formes d'une extrême complexité géométrique tel que le program Rhinocéros. En référence aux travaux de Fabrizio Banfi (Banfi, 2017), la modélisation architecturale 3D dans son ensemble est divisée en 10 niveaux hiérarchiques selon le degré de complexité appelés Grades of Generation GoG. En effet, cette hiérarchie va d'une simple extrusion d'une surface plane à la création d'une surface maillée à partir d'un ensemble de points dans l'espace comme démontré dans la Section 3.2.

Cependant, afin d'assurer le passage d'un nuage de points de l'agrégat de la Casbah d'Alger à une maquette numérique paramétrique HBIM, il est fortement recommandé de maîtriser un certain nombre d'outils numériques importants ainsi que l'utilisation de techniques de modélisation particulières comme démontré dans la Section 3.3. La Fig 3.1.2 montre un diagramme du workflow général développé dans ce chapitre.

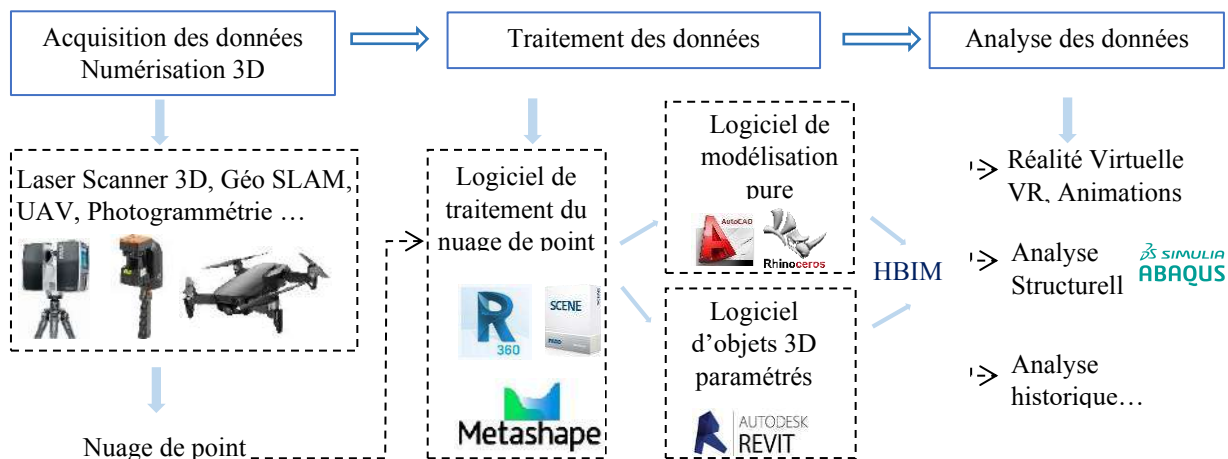
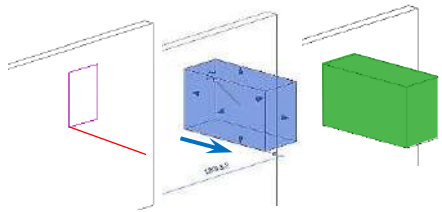
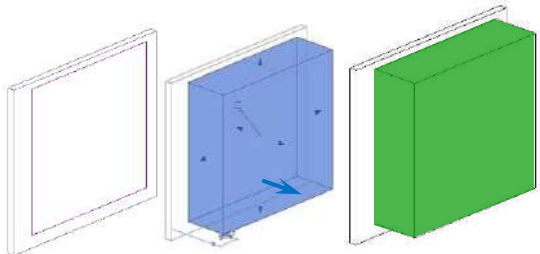
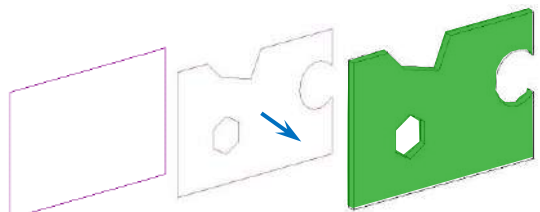
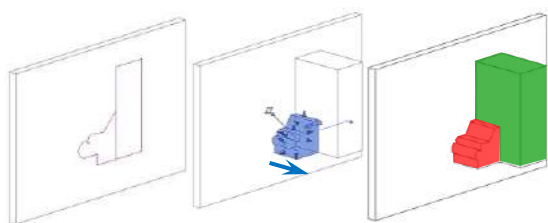


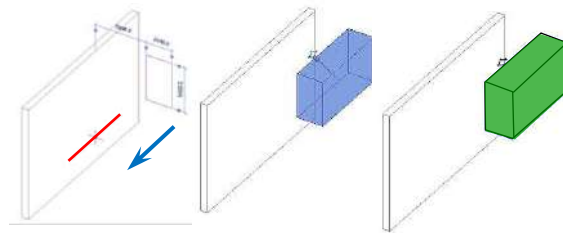
Fig 3.1.2 Workflow d'exploitation des nuages de points (Source : auteur).

3.2 Grades of Generation GoG

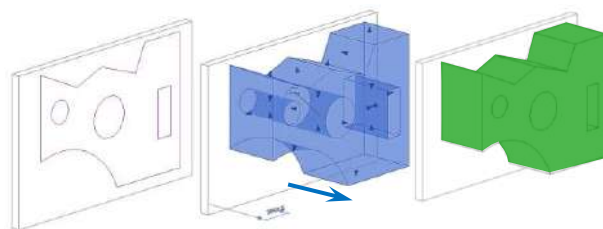
Il existe 10 grades de génération GoG tels que définis par F. Banfi, dont les deux derniers ne sont pas disponibles dans les applications BIM. Les GoG 9 et 10 nécessitent des connaissances approfondies afin de manipuler la modélisation 3D basée sur des algorithmes NURBS. Ces derniers sont extrêmement importants car ils permettent de définir des objets endommagés, irréguliers et complexes qui caractérisent souvent le patrimoine bâti. Un exemple pertinent de pathologie structurale (flexion verticale d'un mur de façade) de l'agrégat est présenté dans la [Section 3.3](#). Le [Tab 3.2.1](#) montre les 10 GoG, du plus simple au plus complexe, chaque GoG est représenté géométriquement par ses propriétés géométriques primitives, la modélisation requise et l'objet 3D final.

GoG	Description	Illustration
1	<i>Extrusion :</i> Extruder la <i>forme</i> à partir d'une <i>ligne droite</i> le long d'une <i>direction orthogonale</i> . Il représente le premier GoG pour les <i>objets paramétriques 3D</i> dans l'application BIM.	
2	<i>Edit profile :</i> Prolonger les formes des <i>profils verticaux</i> suivant une <i>direction parallèle</i> pour se projeter dans l'espace 3D. Il est possible d'éditer le profil et d'avoir une mise à jour directe de la forme des objets 3D. Il représente le deuxième GoG pour les <i>objets paramétriques 3D</i> dans l'application BIM.	
3	<i>Edit profile avec des espaces vidés :</i> Prolonger la <i>forme</i> de plusieurs profils suivant une <i>direction orthogonale</i> . Il est possible d'éditer son profil et de créer des espaces vides. Il représente le troisième GoG pour les <i>objets paramétriques 3D</i> dans l'application BIM.	
4	<i>Sweep :</i> Prolonger les formes à partir de deux <i>profils</i> en suivant des <i>directions spécifiques</i> . Il est possible d'ajouter un nouveau profil et de créer des <i>objets sub3D</i> avec des primitives géométriques de différence. Il représente le quatrième GoG pour les <i>objets paramétriques 3D</i> dans l'application BIM.	

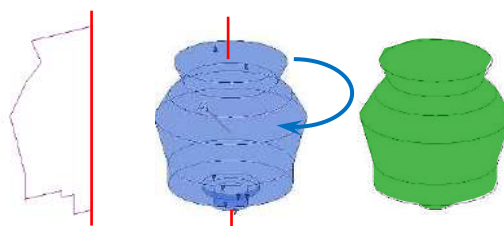
- 5 *Reveal :*
Extruder un **profil** le long d'une **trajectoire**. L'extrusion du deuxième profil permet d'obtenir une soustraction volumétrique (découpe) de l'objet 3D principal. Il représente le cinquième GoG pour les **objets paramétriques 3D** dans l'application BIM.



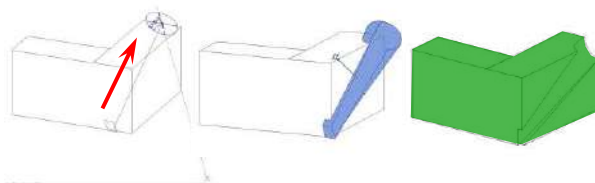
- 6 *Extrusion des profils irréguliers :*
Prolonger la **forme irrégulière** d'un profil en suivant une **trajectoire**. L'extrusion permet d'obtenir plus de complexité pour le volume. Il représente le sixième GoG pour les **objets paramétriques 3D** dans l'application BIM.



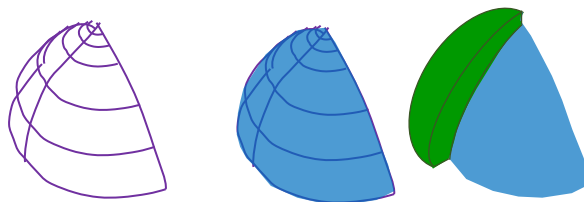
- 7 *Revolve :*
Créer une forme en balayant un **profil** autour d'un **axe**. Il représente le septième GoG pour les **objets paramétriques 3D** dans l'application BIM.



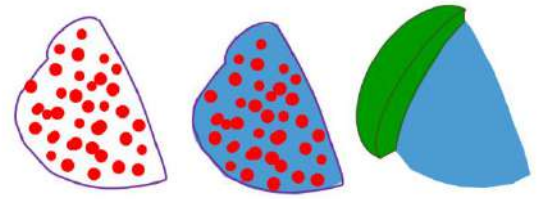
- 8 *Loft, Sweep et sweep blend :*
Créer une fusion qui balaie le long d'un **tracé défini**. La forme est déterminée par les 2 profils. Chaque GoG permet d'utiliser des **vides** pour supprimer une partie de l'objet 3D principal. Il représente le huitième GoG pour les **objets paramétriques 3D** dans l'application BIM.



- 9 *NURBS à partir d'un système filaire 3D :*
Les applications NURBS permettent la génération de formes irrégulières. Ils sont contrôlés par un **bord extérieur fermé** et des **courbes de section interne**. Dans l'application BIM, il est possible de réaliser un **objet 3D** avec l'épaisseur correspondante en sélectionnant la **surface NURBS** précédemment produite.



- 10 *NURBS à partir d'un ensemble de points : La méthode testée permet la génération de formes irrégulières interpolant un **bord extérieur fermé** et un **ensemble de points de contrôle internes**. Dans l'application BIM, il est possible de réaliser un **objet 3D** avec l'épaisseur correspondante en sélectionnant la **surface NURBS** précédemment produite. (Banfi, 2017)*



Tab 3.2.1 Grades of Generation (Source : auteur)

3.3 Du nuage de points à la Modélisation de l'Information des Bâtiments Historiques HBIM

L'assemblage final du nuage de points de l'agrégat via le logiciel Recap d'Autodesk nous a permis d'obtenir un fichier d'une taille avoisinant les 130 GB (Section 2.3.2.2). Il est quasiment impossible de gérer ce fichier avec un logiciel de modélisation 3D et surtout avec le matériel informatique disponible. L'obtention du modèle architectural paramétré de l'agrégat, en reproduisant correctement les formes architecturales régulières et irrégulières existantes à partir du nuage de points, n'a été possible qu'en passant par six étapes au total et en utilisant quatre logiciels (Fig 3.3.1).

La première phase consiste à utiliser le logiciel Recap pour séparer et diviser le nuage de points de l'agrégat en cinq parties, chacune d'elles correspond à une maison.

La deuxième phase consiste à importer dans le programme Autocad d'Autodesk (format rcg) le nuage de points de chaque maison. La gestion du nuage de points dans ce programme permet la création de sections horizontales et verticales d'une épaisseur de 0,05 m. Cette phase est très importante car elle permet de retracer non seulement le plan et de créer des repères utiles lors de la modélisation 3D, mais aussi de vérifier la verticalité, l'horizontalité et l'inclinaison des éléments architecturaux et structurels.

La troisième phase consiste à exporter le nuage de points ainsi que les sections horizontales et verticales (format dwg) obtenues respectivement à partir des deux premières phases dans le programme Revit. Les deux fichiers doivent être automatiquement positionnés de centre à centre au moment de l'importation afin de garantir une parfaite superposition. Les formes régulières sont directement modélisées sur la base des 08 Grades of Generation GoG disponibles dans Revit (Banfi, 2017). Les matériaux correspondant aux maisons de la Casbah sont créés dans cette phase en leur attribuant leurs caractéristiques visuelles, mécaniques et physico-chimiques.

La quatrième phase consiste à sélectionner dans Autocad les nuages de points correspondant aux parties irrégulières des maisons telles que les solives en bois composant les planchers, les colonnes torsadées ou les murs irréguliers en plan et en coupe. Des sections verticales et horizontales sont

créées pour ces pièces d'une épaisseur de 0,05 m et sont exportées dans Rhinoceros (format dwg) avec leurs nuages de points. Cela permet de modéliser toutes les formes irrégulières à l'aide des NURBS et sur la base des deux Grades of Generation GoG 09 et 10 (Barazzetti, et al., 2015).

La cinquième phase consiste à importer dans Revit (format dwg / acis) toutes les parties irrégulières modélisées lors de la phase précédente. Avant de les insérer dans le projet existant, il est nécessaire de les configurer, cela permet le passage d'un modèle purement géométrique à un modèle paramétré configuré BIM. Les cinq premières phases sont appliquées à toutes les maisons séparément, ce qui permet d'obtenir un total de cinq modèles paramétriques HBIM avec une précision optimale.

La sixième et dernière phase consiste à assembler les cinq modèles dans Revit en se référant au nuage de points global de l'agrégat **Fig 3.3.2**.

À la fin de la modélisation architecturale, nous obtenons deux modèles HBIM, un premier modèle architectural englobant toutes les composantes architecturales qui seront utilisées lors de l'analyse de stratification de l'agrégat (**Section 3.4**), un deuxième modèle contenant uniquement les éléments de structure, seront utilisés lors de l'analyse structurelle par Eléments Finis FEA (**Section 3.5**).

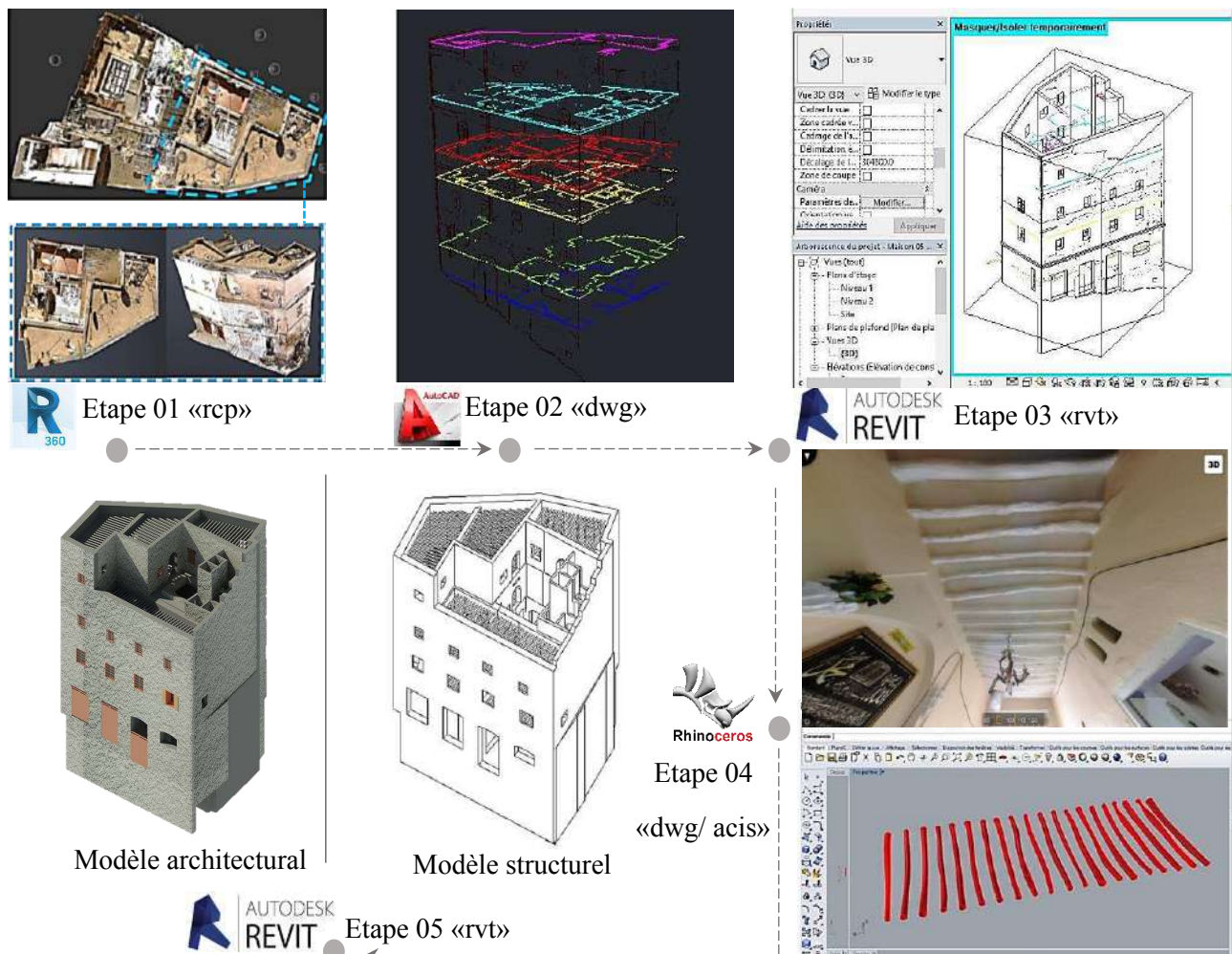


Fig 3.3.1 Processus de la modélisation architecturale : passage du nuage de point au modèle HBIM (Source : auteur).

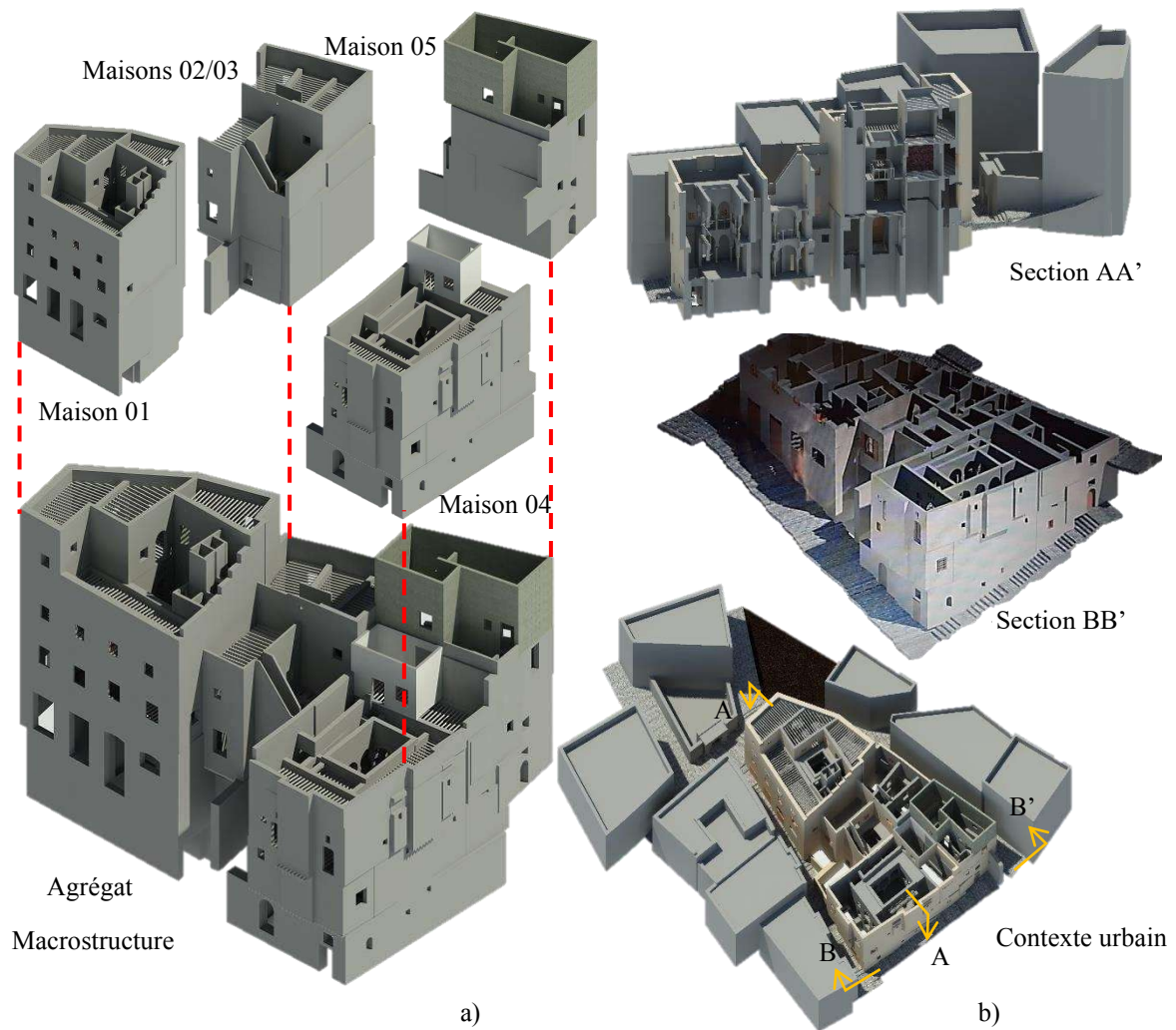


Fig 3.3.2 a) 6^e étape du processus de la modélisation architecturale. Assemblage final de l'agrégat, le modèle structurel, b) aperçu général de l'agrégat : modèle architectural (Source : auteur).

Sur la base du nuage de points obtenu, le GoG 10 qui est le plus adapté à la modélisation des pathologies structurelles est utilisé pour modéliser la façade nord de la maison 1 ayant subi une flexion verticale ([Section 2.3.4](#)). En se référant aux explications présentées dans le [Tab 3.2.1](#), le processus de modélisation de la pathologie est illustré dans la [Fig 3.3.3](#). En créant une section transversale de la façade dans Revit, la déformation de la partie convexe de celui-ci est estimée à 139 mm par rapport à son plan vertical.

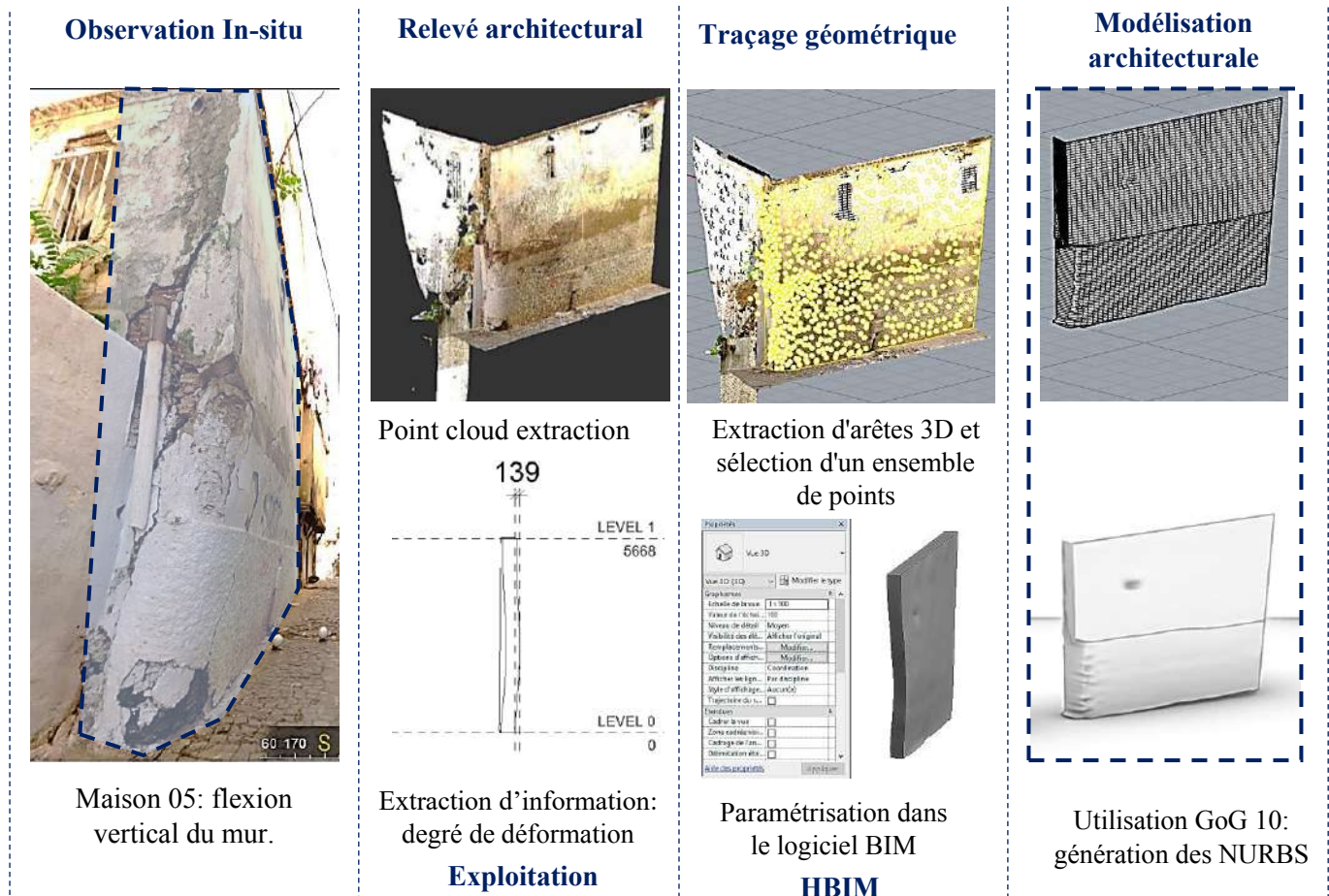


Fig 3.3.3 Pathologie structurale murale : processus de modélisation (Source : auteur).

3.4 Modèle architectural : analyse de stratification architecturale

La littérature disponible sur les typologies architecturales et constructives des maisons de la Casbah d'Alger est abondante. En effet, plusieurs auteurs et chercheurs se sont intéressés à l'ancienne médina en raison de sa singularité et distinction depuis le début de la colonisation française en 1830. Elle constitue une base de référence importante pour compléter et justifier l'analyse de stratification de l'agrégat. L'analyse visuelle de celui-ci basée principalement sur le relevé architectural et photographique 3D nous fournit d'amples informations sur les différents matériaux employés, les techniques de construction et les transformations apportées aux maisons de la Casbah pendant et après la période de l'occupation française. Les modifications peuvent être visualisées à travers les dessins techniques de l'état de conservation de l'agrégat présentés dans la [Section 2.3.4](#).

Les interventions enregistrées au niveau de l'agrégat peuvent être classées en trois catégories distinctes et hiérarchisées en fonction de leur degré d'impact sur l'authenticité et l'intégrité des maisons.

La première catégorie est de nature structurelle et constructive : deux principales interventions structurelles sont menées pendant la période coloniale française.

Le plancher originel de la galerie est remplacé par des planches en bois. En effet, le plancher d'origine et typique des maisons de la Casbah d'Alger est généralement composé de cinq strates superposées qui sont mentionnées par ordre décroissant dans ce qui suit: (1) le revêtement de finition (carreaux en terre cuite), (2) le mortier d'argile, (3) l'agglomérat de terre, (4) les voliges en bois emboîtées par le biais d'une découpe à 45°, (5) les rondins de *Thuja* qui supportent et transmettent le poids du plancher aux murs porteurs (Ravéreau, 1989).

La deuxième intervention est notée au niveau de la maison 01 à travers deux transformations structurelles importantes et facilement identifiables : l'hétérogénéité du système constructif et des matériaux de construction. La première date de l'époque française qui se manifeste par le remplacement du plancher originel de la maison par un plancher voûté (poutrelles métalliques et voûtes en briques pleines). La seconde pendant la période postcoloniale à travers l'ajout d'un niveau entier aux trois déjà existants, construit principalement en briques creuses non porteuses. Ces transformations et ajouts à caractère constructif sont également justifiés par le gauchissement et la flexion verticale du mur porteur inférieur (Fig 2.3.6).

La deuxième catégorie est de nature architecturale. Des espaces de vie s'ajoutent aux terrasses des maisons 01 et 02. Ces ajouts réalisés à l'époque postcoloniale, en briques creuses non porteuses et recouverts de toitures légères composées de tôles de zinc nervurées posées sur des planches et poutrelles en bois de section rectangulaire. La typologie architecturale des maisons de la Casbah se caractérise par son introversion qui explique la petitesse / sous-dimensionnement de ses fenêtres donnant sur l'extérieur. Ses ouvertures assurent la bonne ventilation à l'intérieur des maisons (Missoum, 2003). Un agrandissement de plusieurs fenêtres pendant les périodes coloniale et post-coloniale est également noté dans les cinq maisons.

La troisième catégorie est esthétique et ornementale. Les revêtements de sol d'origine à base de carreaux de terre cuite ou de marbre sont remplacés dans les cinq maisons et dans certaines zones par un revêtement préfabriqué. Les revêtements muraux d'origine *Zelidg* (faïence) qui se trouvent principalement dans les zones humides, le sous-sol des galeries et les arcades entourant les patios sont remplacés dans certaines parties spécifiques par des carreaux de faïence fine. Ces constatations sont notées dans les trois patios des maisons 05, 03 et 04. Par conséquent, on constate que les maisons qui ont subi le moins de transformations sont les maisons 02, 03 et 04.

Toutes les informations relatives à la stratification de l'agrégat sont jointes au modèle numérique BIM via le programme Revit. Les différentes transformations, la période d'intervention et les descriptions sont représentées à l'aide d'un code chromatique spécifique Fig 3.4.1.

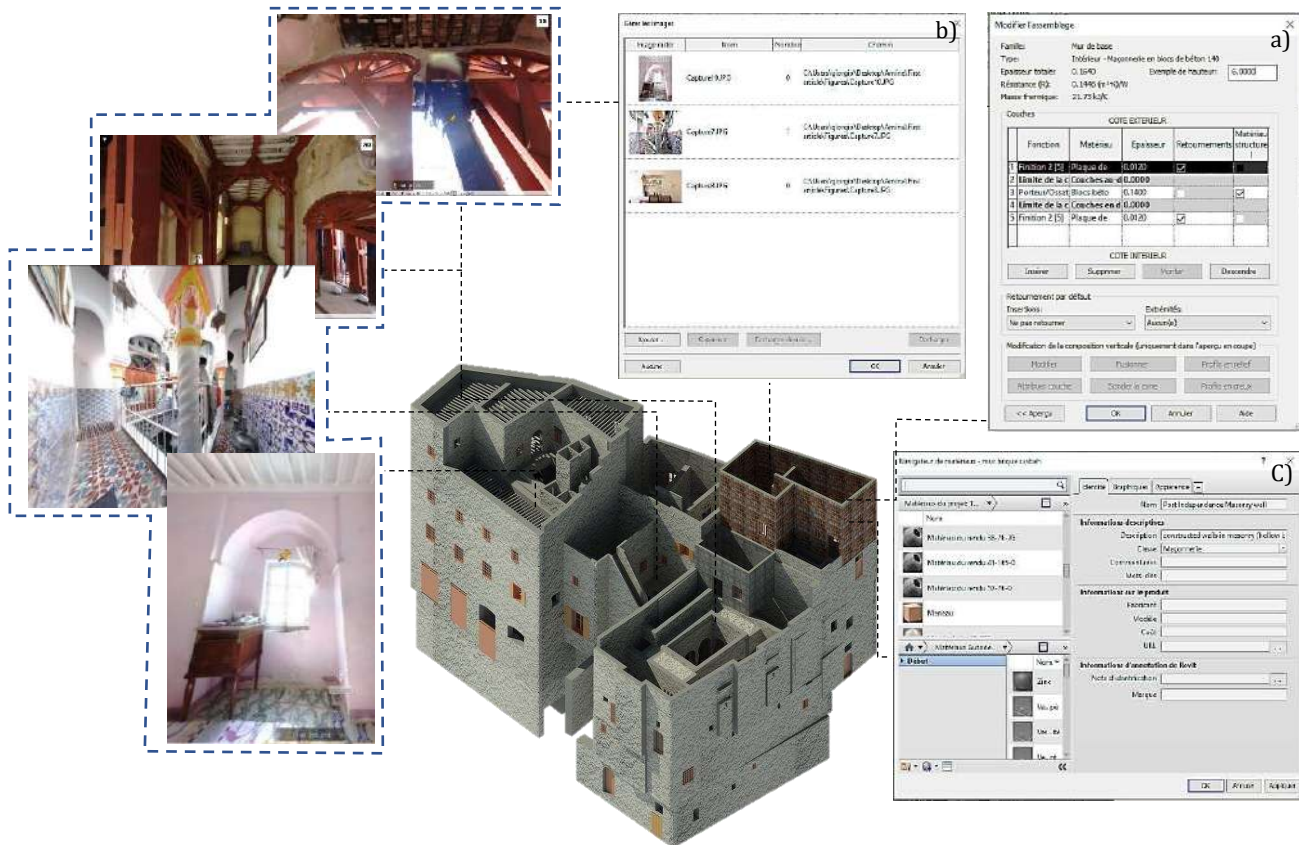


Fig 3.4.1 Association des informations au modèle architectural HBIM (Source : auteur).

a) Insertion des propriétés des matériaux de construction, b) insertions d'images et des détails techniques, c) création des textures

3.5 Modèle structurel : Modélisation par Éléments Finis FEM

Le processus de modélisation illustré dans la [Section 3.3](#) nous permet d'obtenir un modèle numérique paramétrique de l'agrégat avec un haut degré de précision.

Le modèle structurel englobe spécifiquement les éléments qui composent le système constructif de l'agrégat. En effet, les murs, les colonnes, les chainages et les poutres sont regroupés en 3 familles distinctes dans Revit en raison de la différence des matériaux qui les constituent.

Chaque famille est exportée séparément au format ACIS, puis réassemblée dans le logiciel d'analyse par Éléments Finis (FEA) Abaqus ([Fig 3.5.1](#)). Cette étape est très importante car elle permet dans un premier temps de créer le matériau correspondant à chaque famille et dans un second temps de configurer différemment le type et la taille du maillage.

Il est nécessaire de spécifier le mode d'importation des modèles structurels ou des groupes dans Abaqus, nous notons deux manières différentes à savoir : (1) Création d'éléments individuels séparés ou (2) combiner en un modèle unique. Nous choisissons le second mode avec fusion des régions solides.

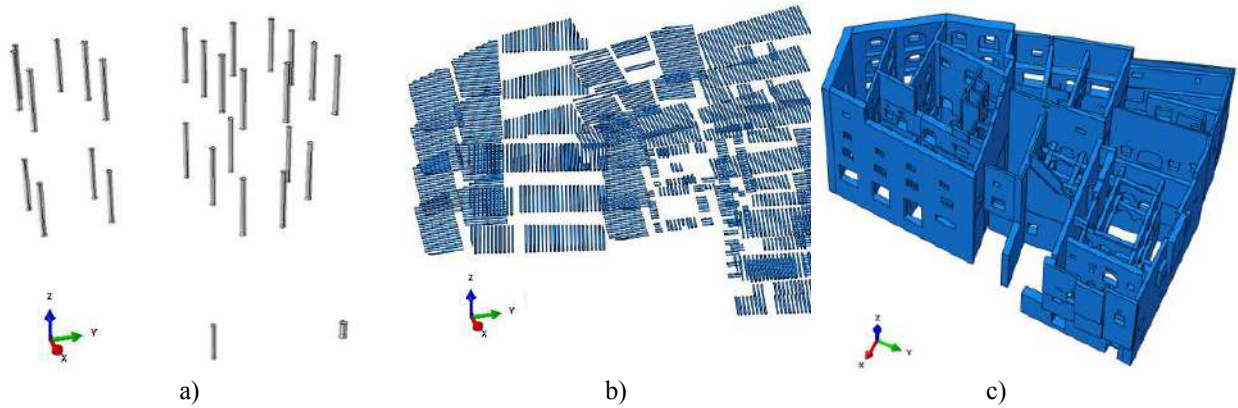


Fig 3.5.1 Les trois familles exportées dans Abaqus à partir du modèle HBIM développé dans Revit (Source: auteur).

a) colonnes, b) poutres en bois, c) murs porteurs

Le modèle final assemblé dans Abaqus permet de réaliser plusieurs types d'analyses structurales (linéaire, non linéaire, sismique, modale, Pushover...).

La création du maillage global de l'agrégat est la première étape essentielle avant d'entamer la configuration du modèle. Une première vérification automatique de la géométrie du modèle est réalisée au préalable et a permis d'effectuer les premières observations. En effet, tous les murs porteurs contenant des niches sont représentés en marron et n'ont pas pu être maillés en utilisant le type hexaédrique en raison de la complexité de certaines formes géométriques. Seuls les murs jaunes et verts représentent les murs dont la géométrie est validée et reconnaissable par le programme Abaqus. Le maillage automatique dans ce cas est partiel comme le montre la [Fig 3.5.2](#). Par conséquent, l'utilisation du maillage manuel est indispensable en utilisant le type tétraédrique.

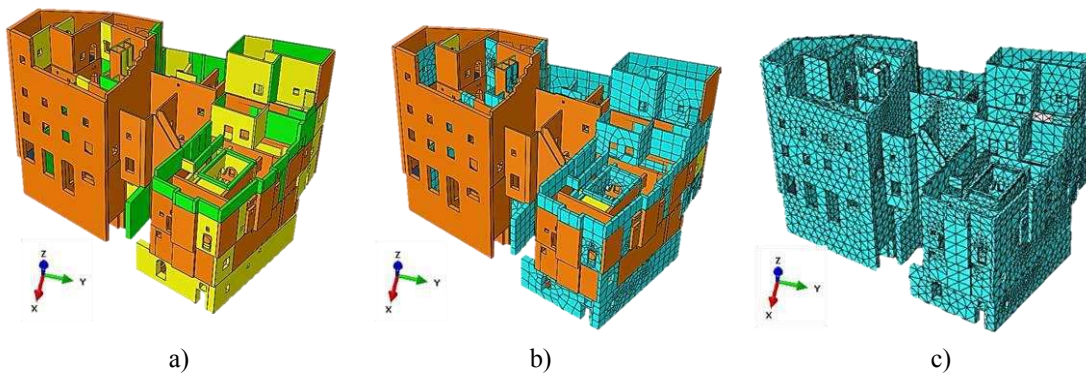


Fig 3.5.2 les différentes phases du maillage (Source : auteur).

a) Une vérification géométrique du modèle structurel ; b) le résultat du maillage automatique ; c) le résultat du maillage manuel tétraédrique.

Le deuxième maillage obtenu comprend l'ensemble de l'agrégat et met en évidence certaines anomalies, telles que les distorsions et les concentrations de mailles autour des ouvertures de ventilation de formes ovoïdales, elliptiques ou ovales ainsi que les niches décoratives (Profondeur P : $30 < P < 50\text{mm}$) et / ou fonctionnelles ($125 < P < 400\text{ mm}$) ([Fig 3.5.3](#)).

Ajoutant à cela la discontinuité du maillage entre les différents niveaux. En effet, le nuage de points obtenu révèle la présence d'un décalage et d'un désalignement de quelques centimètres entre les parois superposées des différents niveaux qui sont pris en compte indubitablement lors de la modélisation architecturale **Fig 3.5.3**.

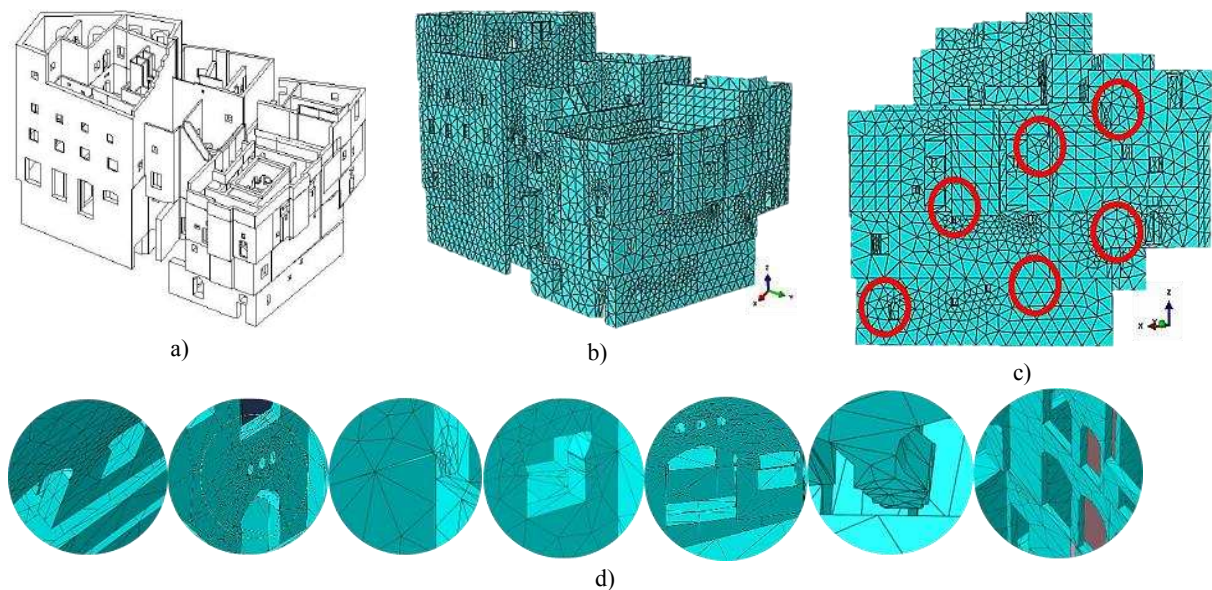


Fig 3.5.3 a) Modèle structurel (HBIM), b) Présentation générale du maillage, c) anomalies de maillage constatées sur la façade Est, d) déformations locales spécifiques du maillage (Source : auteur).

La simplification de la géométrie de certains éléments architecturaux est nécessaire voire indispensable, nous citons: (1) l'outrepassement et l'imposte des arcs (brisés ou plein cintre) sont simplifiés, (2) les niches fonctionnelles avec arcs en anse de panier sont dépourvues de décorations supplémentaires, (3) les niches purement décoratives sont supprimées, (4) les colonnes torsadées composant les patios sont transformées en colonne à fût lisse et (5) les décalages de paroi inférieurs à 70 mm sont redressés.

Il est important de noter que le modèle structurel HBIM obtenu dans Revit après simplification géométrique **Fig 3.5.4** n'affecte pas le comportement structurel de l'agrégat. L'analyse structurelle menée dans le cadre de cette recherche est d'ordre global c'est-à-dire à l'échelle MACRO (au niveau de l'agrégat) et non à l'échelle MICRO (à l'échelle d'une portion structurelle).

Le résultat du maillage final obtenu dans Abaqus après la simplification des formes géométriques est présenté dans la **Fig 3.5.4**. Les caractéristiques mécaniques des matériaux de construction sont introduites après vérification du maillage, en respectant les valeurs obtenues en laboratoire (**Section 4**).

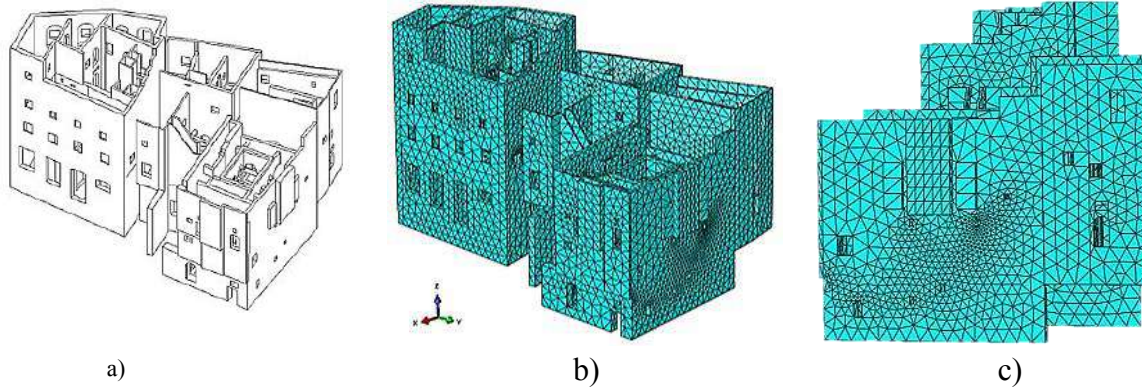


Fig 3.5.4 a) Le modèle structurel (HBIM) après simplification géométrique, b) l'aperçu général du maillage, c) le maillage de la façade Est (Source : auteur).

3.6 Conclusion

La réalisation du relevé architectural en couleur avec une haute résolution est certainement recommandée pour une meilleure lecture et précision du nuage de points. Néanmoins, l'indisponibilité d'équipements informatiques (hardware) extrêmement puissants pourrait constituer un obstacle majeur lors de l'exploitation du nuage de points.

Le réglage du scanner laser 3D (nombre de stations, résolution, couleurs) doit prendre en compte la nature, l'importance et la morphologie de l'objet architectural à scanner, d'où la nécessité de réaliser plusieurs visites in situ et d'avoir un œil observateur. Cela réduirait la taille du nuage de points et faciliterait ainsi sa gestion, son traitement et son exploitation.

La création d'un modèle architectural complet et précis à partir d'un nuage de points volumineux d'une Architecture Vernaculaire entrelacée et imbriquée est le principal défi présenté de ce chapitre.

La compatibilité existante entre les logiciels fondés sur le BIM et les NURBS (interchangeabilité des formats : rvt, dwg, rcp, pts, acis), représente une solution envisageable et adaptée pour modéliser les formes les plus irrégulières et concevables des agrégats telles que les rondins de *Thuja* ou les pathologies structurelles.

Le passage du nuage de points au modèle HBIM au maillage 3D est un processus important, qui permet d'obtenir un modèle numérique 3D avec un haut degré de précision. Ceci est d'une extrême importance car la précision des résultats de l'analyse structurelle en dépend fortement. Un autre avantage du modèle architectural HBIM obtenu est la possibilité de son exploitation dans différents types d'analyses, comme l'analyse de stratification de l'agrégat démontrée dans ce chapitre, l'analyse structurelle par Eléments Finis dans le chapitre 5 et la Réalité Virtuelle dans le chapitre 6.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons la caractérisation mécanique des matériaux de construction des maisons de la Casbah d'Alger, en se basant sur trois types de tests à savoir : destructif, semi-destructif et non destructif.

Chapitre 4

Tests de laboratoire

4.1 Introduction

Une intervention structurelle correcte et adaptée sur un bâtiment historique nécessite tout d'abord une bonne compréhension des matériaux de construction qui le constituent (López-Arce, et al., 2003). Les tests destructifs sont souvent privilégiés pour caractériser les matériaux de construction historiques en raison de l'obtention d'une meilleure précision des résultats. En revanche, les échantillons prélevés in situ sont généralement d'une disponibilité limitée, voire impossibles à obtenir. D'autre part, la caractérisation mécanique des matériaux de construction historiques qui ne correspond pas aux normes de fabrication actuelles (géométrie, procédés de fabrication, composition physico-chimique) représente une autre difficulté à laquelle sont confrontés les spécialistes de la restauration et de la réhabilitation des sites historiques. Cependant, des techniques alternatives peuvent être utilisées afin d'obtenir des résultats aussi fiables que possible.

La caractérisation des matériaux de construction est un aspect fondamental à la fois de l'évaluation des performances structurelles des bâtiments historiques mais aussi de la conception des interventions de mise à niveau structurelles.

Les informations obtenues grâce aux inspections visuelles de l'agrégat, à l'analyse formelle et géométrique, aux charges appliquées, aux tests destructifs et non destructifs des matériaux de construction permettent de comprendre et de déduire les sources d'anomalies structurelles, telles que l'apparition des fissures, l'hors plan des murs porteurs etc. En outre, les résultats des tests mécaniques permettent de calibrer le modèle numérique lors d'une analyse structurelle, quel que soit son type (statique linéaire, statique non linéaire, dynamique ...) (Zouaoui, et al., 2020).

L'échantillonnage in situ de matériaux historiques est une difficulté en soi, en particulier lorsqu'il s'agit de bâtiments historiques classés ou protégés telle que la Casbah d'Alger dont le nombre d'échantillons autorisés est très limité (Lourenco, et al., 2010), (Binda, et al., 1996) et (Marastoni, et al., 2016). Cette contrainte met en évidence la valeur de la caractérisation directe par des tests mécaniques destructifs (Fernandes, et al., 2007) et (Mazzotti, et al., 2017).

Les normes actuelles régissant le processus de caractérisation des matériaux de construction sont principalement destinées aux nouvelles constructions et aux matériaux de construction modernes. Il convient de noter que dans la plupart des cas, les matériaux historiques ont subi des processus de fabrication différents qui ne sont pas pris en compte par les normes actuelles (Lombillo, et al., 2013).

À travers les recherches présentées dans ce chapitre, nous illustrons l'ensemble du processus de caractérisation mécanique des échantillons historiques sélectionnés en appliquant à la fois les normes actuelles et des techniques alternatives basées sur des tests destructifs, semi-destructifs et non destructifs.

Le processus de caractérisation mécanique de la brique en terre cuite, du mortier de chaux et d'argile et du bois de *Thuja* est présenté dans ce qui suit. Les briques de la période ottoman ne dépassent pas 40 mm d'épaisseur, tandis que la longueur (L) varie entre 220-300 mm et la largeur (l) est comprise entre 110-140 mm, avec un rapport longueur sur largeur L / l égale à 2 (Chergui, 2007). Les rondins de *Thuja* ont un diamètre variable de 80 à 130 mm.

Les tests mécaniques destructifs sont organisés en trois applications, à savoir :

1. Le premier test est un test de compression unidirectionnel appliqué à des briques en terre cuite et organisé en deux étapes distinctes : (1) une première étape utilisant des extensomètres amovibles pour obtenir le module d'élasticité ; (2) une deuxième étape

utilisant le Système Optique par vidéo caméra (OS) afin d'obtenir les courbes élasto-plastiques contrainte-déformation et le coefficient de Poisson.

2. Le deuxième test est un test de compression unidirectionnelle appliqué à trois différents états de conservation des échantillons de *Thuja* pour déterminer le module d'élasticité ainsi que l'obtention des courbes élasto-plastiques contrainte-déformation.
3. Le troisième test est axé sur l'obtention de la résistance à la compression des briques en terre cuite et du bois de *Thuja*.

Les essais mécaniques semi-destructifs sont organisés en deux applications, à savoir :

1. L'application du Pénétromètre sur un fragment de mur pour estimer la résistance à la compression du mortier de chaux et d'argile.
2. L'application du Résistographe sur les trois échantillons *Thuja* afin d'évaluer l'homogénéité des fibres et la résistance à la pénétration (perforation).

Les tests mécaniques non destructifs sont organisés en deux applications, à savoir :

1. Un test d'humidité appliqué aux trois échantillons de *Thuja* en utilisant un capteur d'humidité.
2. Des tests ultrasoniques appliqués à la fois aux briques en terre cuite et au bois de *Thuja*.

Les données extraites de ces échantillons, ayant des caractéristiques dimensionnelles et compositionnelles différentes de celles exigées par les normes actuelles, représentent la référence pour les analyses structurales et enrichissent la base de données relative à la caractérisation des matériaux de construction historiques des maisons de la Casbah d'Alger. Nous proposons la **Fig 4.1.1** pour résumer les essais mécaniques effectués dans le laboratoire de matériaux de construction de *Politecnico di Milano*.

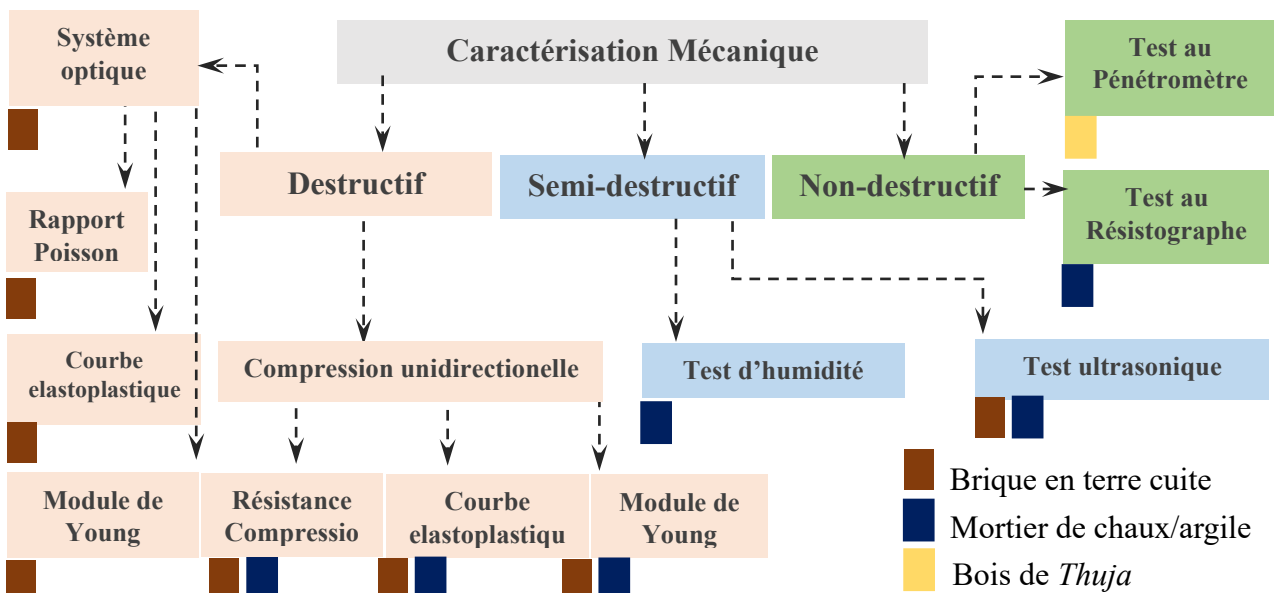


Fig 4.1.1 organigramme récapitulatif des essais mécaniques réalisés en laboratoire (Source : auteur)

4.2 Tests mécaniques destructifs

4.2.1 Méthodologie

4.2.1.1 Méthodes

Deux méthodes distinctes sont appliquées sur les briques afin d'extraire les caractéristiques mécaniques suivantes : le module d'élasticité (module de Young), la résistance à la compression, la courbe élasto-plastique contrainte / déformation et enfin le coefficient de Poisson.

La première méthode consiste à déterminer le module de Young à l'aide d'extensomètres amovibles de «type A» (transducteur de déplacement DD1) très sensibles aux déplacements, la distance entre les deux bornes est égale à 25 mm avec une tolérance de sensibilité de $\pm 0,5 \%$ (**Fig 4.2.1 a**). Des briques de plus de 31 mm d'épaisseur (briques 1, 3 et 4) sont sélectionnées pour cet essai car elles permettent le positionnement correct des extensomètres. En effet, une distance minimale de 3 mm doit être respectée entre les bornes sensibles et les extrémités de l'échantillon (**Fig 4.2.9 d**).

La deuxième méthode consiste à déterminer la courbe élasto-plastique ainsi que le coefficient de Poisson en se basant sur l'OS par caméra vidéo. Cette technique telle qu'expliquée dans (**Section 4.2.1.3.2**), permet d'obtenir la déformation à partir d'échantillons très bas dont l'application d'extensomètre amovible de «type A» est impossible. Pour cette raison, les briques 6 et 7 ont été sélectionnées.

Les briques 2 et 5, dont l'épaisseur n'excède pas 27 mm ou présentent quelques anomalies, sont réservées pour l'obtention de la résistance à la compression référentielle. Cela permettra de configurer le chargement de la machine d'écrasement avant de démarrer les tests.

Afin d'obtenir la courbe élasto-plastique contrainte / déformation sous l'effet de la compression unidirectionnelle du bois de *Thuja*, un autre type d'extensomètre « type B » (LVDT, Linear Variable Displacement Transducer) avec une tolérance de sensibilité de $\pm 0,5\%$ (**Fig 4.2.1 b**) est utilisé selon le processus expliqué dans la **Section 4.2.1.2.2**.

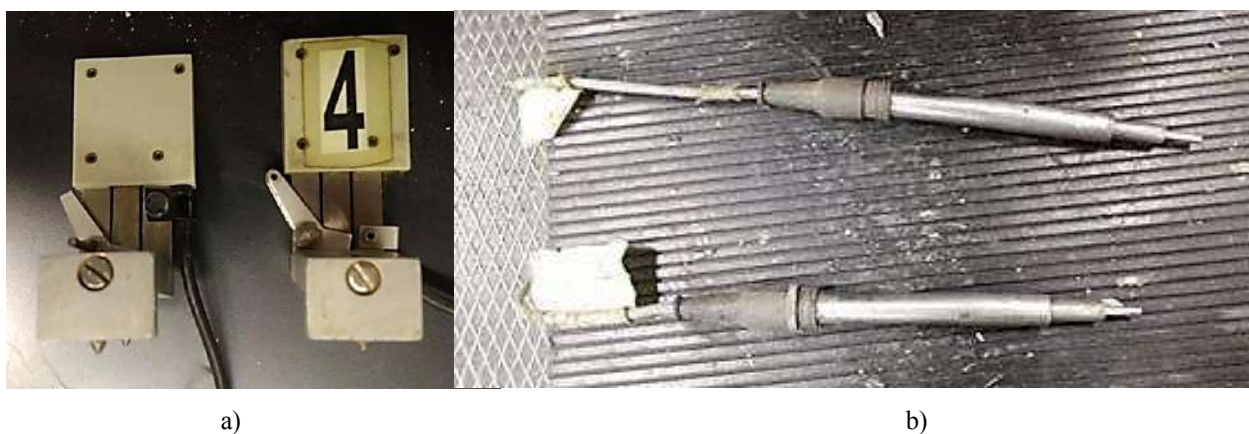


Fig 4.2.1 Extensomètres amovibles (Source : auteur)

a) Type A: pour les échantillons de briques; b) type B: pour les échantillons de bois.

4.2.1.2 Préparation des échantillons

Il est primordial et fondamental de connaître les équipements et normes utilisés au laboratoire avant de commencer tout type de test. Ces normes servent de référence non seulement durant l'analyse et l'interprétation des résultats, mais aussi dans la préparation des échantillons. Pour le test de compression, nous avons utilisé les normes européennes (**EN1052-1, 1999**) et (**EN772-1, 2011**).

4.2.1.2.1 Briques en terre cuite

Les échantillons prélevés in-situ, et notamment ceux des sites historiques, ne sont pas en mesure d'être exploités directement à cause des irrégularités géométriques présentes ou bien en raison de prélèvement dans des conditions inadéquates (taux d'humidité élevé, imperfections, impuretés...).

Cependant, la préparation des échantillons est nécessaire. Pour les briques historiques des maisons de la Casbah d'Alger, quatre étapes ont été nécessaires pour préparer les spécimens qui sont résumés dans la **Fig 4.2.2**. Chaque étape sera détaillée au fur et à mesure.

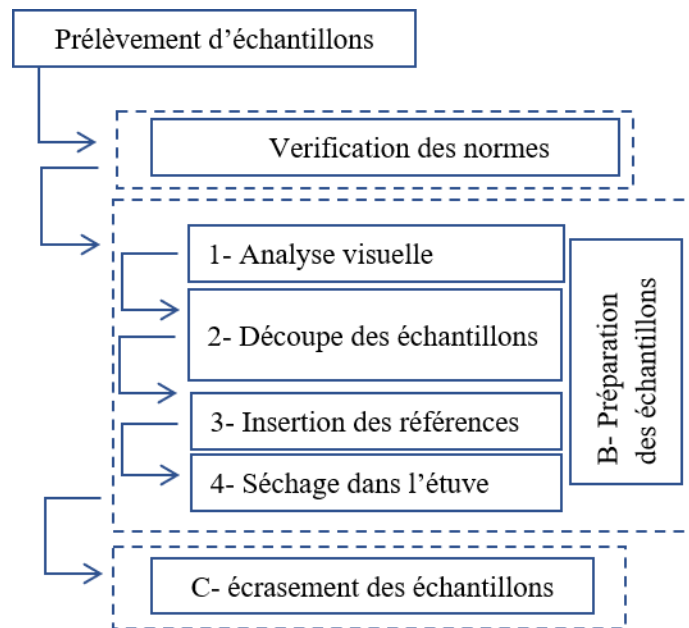


Fig 4.2.2 Etapes de préparation des échantillons (Source : auteur)

La première étape est l'analyse visuelle qui consiste à extraire et mettre en évidence toutes les informations détectables à l'œil nu (**Fig 4.2.3**), à savoir :

1. Prise de mesures,
2. Réalisation de croquis,
3. Noter toutes les pathologies visuelles (fissures...),
4. Noter toutes les spécificités (couleur, texture...)



Fig 4.2.3 Préparation des échantillons, première étape : analyse visuelle, (prise de mesures à gauche, croquis à droite)
(Source : auteur)

La plupart des matériaux de construction utilisés lors de la reconstruction de la Casbah d'Alger datent de la période ottomane c'est à dire le 18^{ème} siècle et d'autres avant même cette période comme matériaux de réemploi.

Les dimensions des briques ne respectaient évidemment pas les normes actuelles, elles sont plus larges et moins épaisses. En effet, l'épaisseur (e) varie entre 33 et 43 mm. La longueur est comprise entre 130 et 200 mm tandis que la largeur varie de 100 à 130 mm.

Afin d'obtenir le module de Young, des prismes verticaux doivent être testés en superposant trois briques afin d'atteindre une hauteur d'environ 120 mm. Compte tenu du nombre très limité d'échantillons extraits, la superposition de plusieurs briques est donc impossible, c'est pourquoi une solution alternative est appliquée. En effet, toutes les briques en terre cuite sont découpées en cubes réguliers de 40 mm de chaque côté, qui seront superposés trois par trois (Fig 4.2.10 b) (Binda, et al., 1996). Ceci représente la seconde étape.

Une ponceuse électrique (Fig 4.2.5 a) est utilisée avant la découpe pour nettoyer et meuler les surfaces des briques de toute éventuelle présence de mortier, de poussière ou d'impuretés jusqu'à atteindre les exigences de planéité et de parallélisme (Fig 4.2.4). Après le nettoyage et le meulage, l'épaisseur des briques est réduite à une plage de 26 à 40 mm. Un coupe-disque électrique pour pierre est utilisé sous jet d'eau afin d'obtenir une coupe nette et précise des cubes (Fig 4.2.5 b).

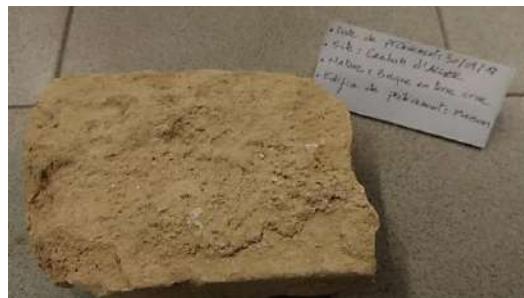


Fig 4.2.4 Présence d'impuretés superficielles et de mortier de chaux sur les briques (Source : auteur)

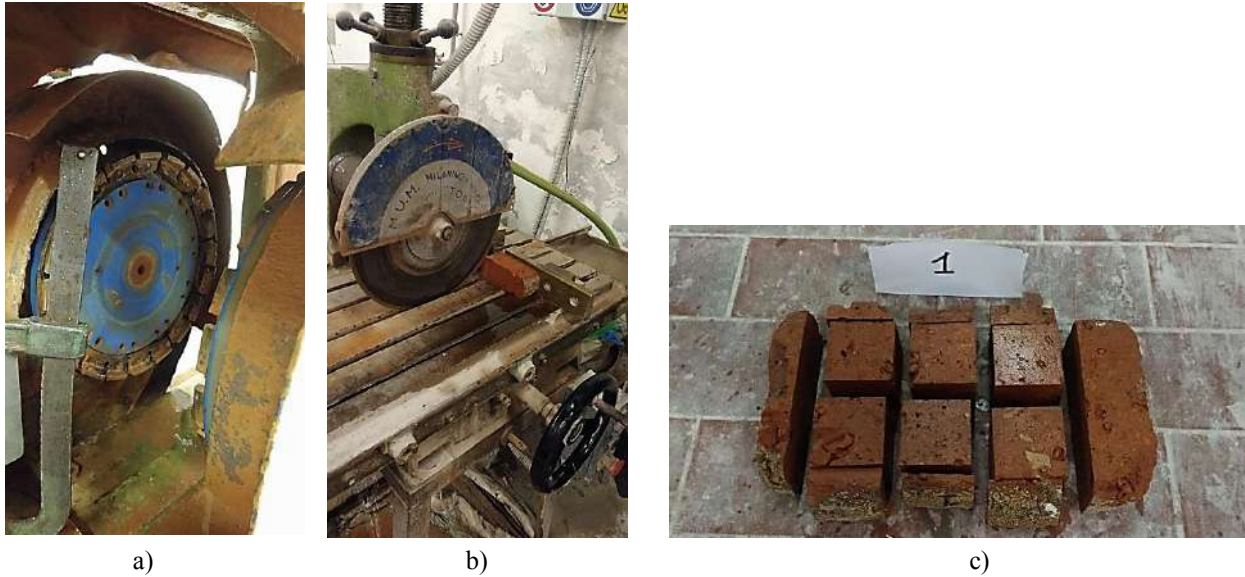


Fig 4.2.5 Processus de préparation des petites cubes (Source : auteur)

a) ponceuse électrique; b) découpe des briques à l'aide d'un coupe-disque électrique; c) obtention de petits cubes

La troisième étape et après avoir découpé toutes les briques, une référence (R) est attribuée à chaque petit cube (1A *, 1B *...), cela nous permettra d'insérer les valeurs correctes pour chaque petit cube au moment des écrasements (**Fig 4.2.6 a**).

La quatrième et dernière étape consiste à mettre les petits cubes au four pendant 48 heures à 105 °C (**Fig 4.2.6 b**). Cette étape permet aux cubes de sécher rapidement et de retrouver leurs caractéristiques mécaniques. Il est également possible de sécher les cubes à l'air libre pendant une semaine au minimum.



Fig 4.2.6 a) Troisième étape : insertion des références, b) quatrième étape : séchage au four (Source : auteur)

Nous avons obtenu 32 petits cubes avec pratiquement les mêmes surfaces ($\pm 1600 \text{ mm}^2$) appartenant aux 06 briques géométriquement différentes. Nous présentons ci-dessous (**Tab 4.2.1**) tous les cubes obtenus en identifiant le type de test (T) appliqué pour chacun, à savoir : module de Young (YM), résistance à la compression référentielle (C*), résistance à la compression (C), OS par caméra vidéo (OS).

Illustration des cubes	R	T	Illustration des cubes	R	T	Illustration des cubes	R	T
	1A	YM+C		2A	C*		3A	YM+C
	1B	YM+C		2B	C*		3B	YM+C
	1C	YM+C		2C	C*		3C	YM+C
	1D	YM+C					3D	YM+C
	1E	YM+C					3E	YM+C
	1F	YM+C					3F	YM+C
	1G	C*						
	1H	C*						
Brique 1			Brique 2			Brique 3		
	4A	C*		5A	C*		6A	OS
	4B	YM+C		5B	C*		6B	OS
	4C	C*		5C	C*		6C	OS
	4D	YM+C		5D	C*		6D	/
	4E	YM+C		5E	C*			
				5F	C*			
Brique 4			Brique 5			Brique 6		
				7A	OS			
				7B	OS			
				7C	OS			
				7D	/			
				7E	/			
				7F	/			
			Brique 7					

Tab 4.2.1 Les cubes référencés obtenus après découpe (Source : auteur)

4.2.1.2.2 Bois de *Thuja*

La préparation des échantillons de bois pour les essais mécaniques est une tâche très difficile en raison des irrégularités des fibres, la présence de nœuds dans la plupart des cas, et de la disproportion géométrique de certaines essences de bois (Exemple : longueur $\gg$ diamètre).

Nous distinguons trois manières différentes de préparer les échantillons de bois pour le test de compression parallèle aux fibres comme recommandé par les normes (EN-408, 2012) et (ISO13061-17, 2017) (Fig 4.2.7), à savoir :

- 1- Petits spécimens en bois nets : section carrée ($S = a \cdot a$) et hauteur $L = 2 \cdot a$.
- 2- Éprouvettes en bois de dimensions réduites : section carrée ($S = a \cdot a$) et hauteur $L = 6 \cdot a$.
- 3- Éprouvettes en bois de dimensions réelles : diamètre (D) et hauteur $L = 6 \cdot D$.

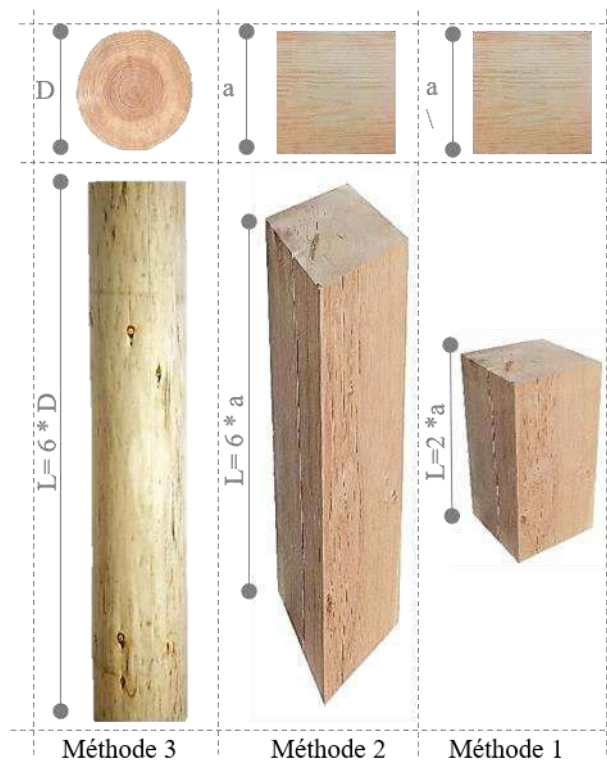


Fig 4.2.7 Préparation des échantillons de bois (Source : auteur)

Les deux premières méthodes sont généralement appliquées pour la caractérisation des matériaux destinés aux nouvelles constructions.

Cependant, la troisième méthode est destinée aux échantillons de bois historiques entre autres les rondins de *Thuja* exportées de la Casbah d'Alger. En effet, cette méthode permet l'application du test de compression directement sur les matériaux tout en conservant ses dimensions réelles. En raison de la fragilité des matériaux historiques et de leurs dimensions souvent réduites, il est difficile de découper ou d'extraire des cubes parfaitement intacts.

Les trois échantillons de bois présentés précédemment dans la [Section 2.4](#), ont une longueur moyenne de 625 mm et un diamètre variable de 56 mm à 98 mm. Les trois échantillons révèlent également une variabilité de diamètre entre leurs deux extrémités.

Une coupe transversale des échantillons perpendiculaire à l'axe médian s'est avérée indispensable pour deux raisons :

1. Eliminer les deux extrémités représentant de très fortes irrégularités géométriques,
2. Assurer une bonne stabilité et un positionnement correct des échantillons dans la machine d'écrasement.

Les échantillons ont désormais une longueur de 400 mm après découpe des extrémités.

Il est impossible dans ce cas de respecter pleinement la norme ([EN-408, 2012](#)) sur les échantillons de bois historiques comme le montre la [Fig 4.2.7](#). Le rapport longueur (L) / diamètre (D) est d'environ 5,7 au lieu de 6 requis par la norme. Les dimensions de chaque échantillon sont présentées dans le [Tab 4.2.2](#).

Trois extensomètres sont prévus pour chaque échantillon avec un angle de 120 ° entre eux permettant de mesurer les déplacements dans toutes les directions.

Chaque extensomètre est fixé à l'aide de deux fixateurs préalablement collés à 100 mm de l'axe transversal de l'échantillon. La distance séparant les fixateurs est donc égale à 200 mm.

Le premier fixateur, celui du bas, maintient l'extensomètre en position, tandis que celui du haut permet d'appliquer une force sur les bornes sensibles lors du test de compression ([Fig 4.2.8](#)), les déplacements sont cependant mesurés.

	Echantillon1	Echantillon 2	Echantillon 3		Echan 1	Echan 2	Echan 3
Section Sup (mm)	75.4 84	56.7 63.7	98.5 85.2	L (mm)			
Si(mm²)	4974.4	2836.7	6591.2	400			
Section Inf (mm)	68.4 72.8	63.11 70.7	85 62				
Si(mm²)	3910.9	3504.4	4139.0				
Moyenne Si(mm²)	4442.65	3170.55	5365.1				

Tab 4.2.2 dimensions des échantillons de bois (Source : auteur)

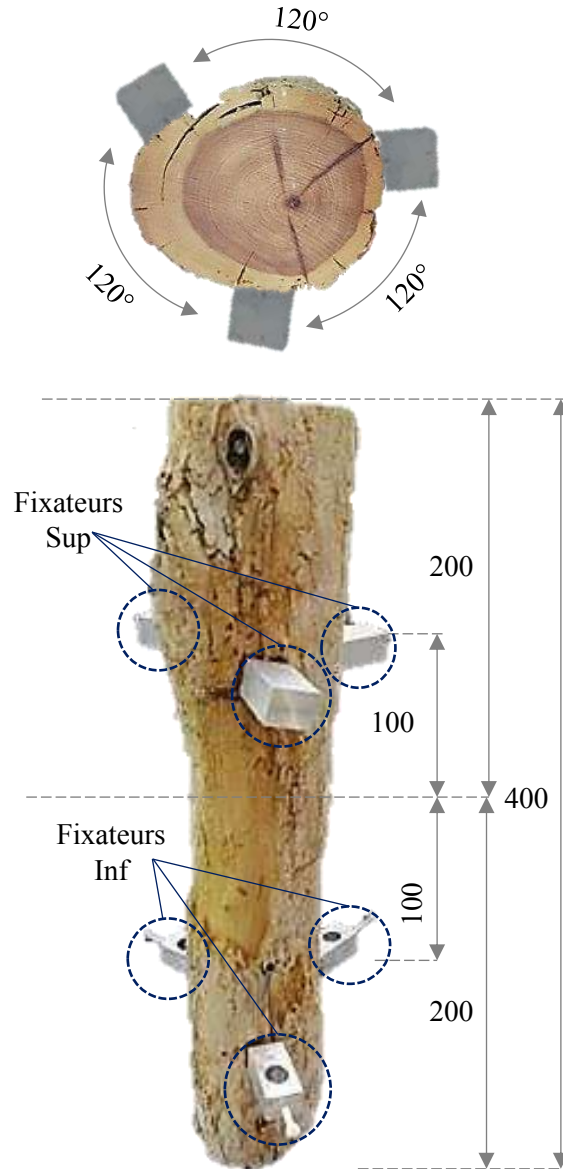


Fig 4.2.8 Positionnement et fixation des fixateurs d'extensomètre (dimensions en mm) (Source : auteur)

En guise de dernière étape et avant les essais de compression, les échantillons sont placés dans une chambre climatique à 70% comme l'exige la norme (EN-408, 2012).

4.2.1.3 Acquisition des données

4.2.1.3.1 Module de Young par application d'extensomètres de type A

Il est important de comprendre la répartition des forces le long d'un échantillon lors d'un test de compression. Les deux plaques supérieure et inférieure de la machine d'écrasement exercent une contrainte de compression croissante (σ) provoquant une dilatation latérale de l'échantillon (Fig 4.2.9 a/b).

Le frottement entre la surface des plaques et celle du cube, limite son expansion transversale dans ses extrémités supérieures et inférieures (Cigni, 1983). Une force tangentielle (τ) opposée à la

direction d'expansion est donc créée aux extrémités du cube. Les forces de frottement parallèles aux plaques sont également présentes entre les strates successives du petit cube, et elles diminuent progressivement jusqu'à atteindre la partie médiane dans laquelle les forces supérieures et inférieures se rencontrent et s'annulent (**Fig 4.2.9 b**). Si nous projetons ces forces sur un plan xy, le cube sera sollicité selon une configuration hyperbolique avec une concavité orientée extérieurement comme indiqué dans la **Fig 4.2.9 c**. La fracture du cube dans ce cas, sera dans la partie médiane où les forces de traction atteignent leur maximum (**Cigni, 1983**). Dans une telle configuration, l'installation d'extensomètre ne peut pas avoir un grand sens puisque le cube subit deux contraintes : la première est normale et longitudinale et la seconde est tangentielle et transversale. Cette situation peut être évitée si l'échantillon adopte une forme parallélépipédique, permettant ainsi d'éloigner les zones de frottement. Les extensomètres peuvent être positionnés sur la partie centrale de l'échantillon et seules les déplacements relatifs seront mesurés (**Fig 4.2.9 d**). Par conséquent, la fracture de l'échantillon aura une configuration verticale conventionnelle.

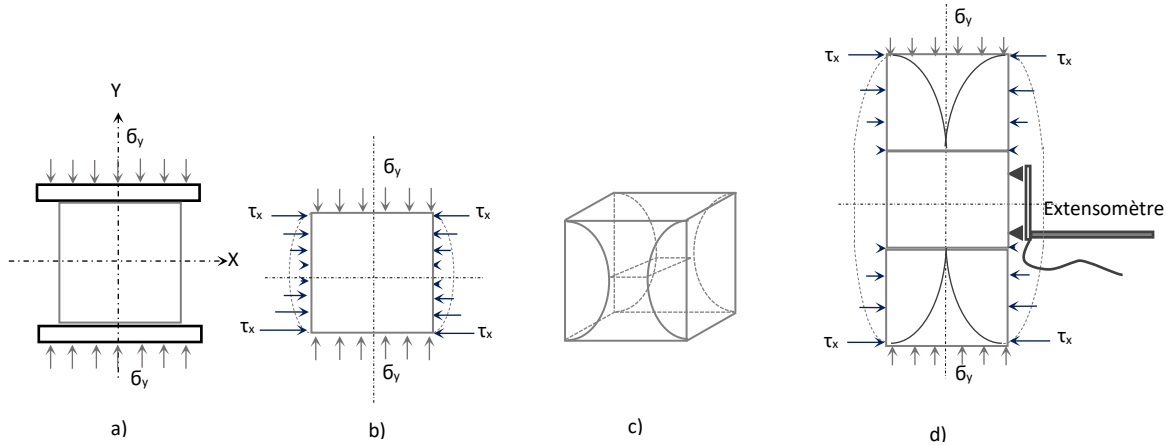


Fig 4.2.9 Théorie de la superposition des cubes (Source : auteur et (**Cigni, 1983**))

Cependant, 3 cubes appartenant à la même brique sont superposés, on obtient ainsi un parallélépipède de 100 à 120 mm de hauteur et 40 mm de chaque côté. Les cubes parfaits sont sélectionnés pour cette étape. Nous fixons adéquatement 4 extensomètres de chaque côté afin d'assurer que seules les bornes sensibles touchent l'échantillon (**Fig 4.2.10 b**). Les extensomètres sont connectés à la machine de contrôle en respectant l'ordre mentionné sur la machine d'acquisition des données (**Fig 4.2.10 a**). Les déformations sont enregistrées de chaque côté.

Avant de lancer les essais, une résistance moyenne référentielle à la compression égale à 16,2 MPa est obtenue en écrasant les cubes les moins intéressants comme mentionné dans le **Tab 4.2.4**. L'ordre de mesure permet de régler la machine de contrôle afin d'obtenir les courbes de déformation sans endommager les échantillons. Trois chargements cycliques sont recommandés par (**EN772-1, 2011**) en augmentant la charge appliquée pour chaque cycle de 30% de la résistance à la compression référentielle. Une fois les tests achevés pour l'ensemble des échantillons, les cubes sont écrasés séparément pour obtenir la résistance moyenne à la compression.

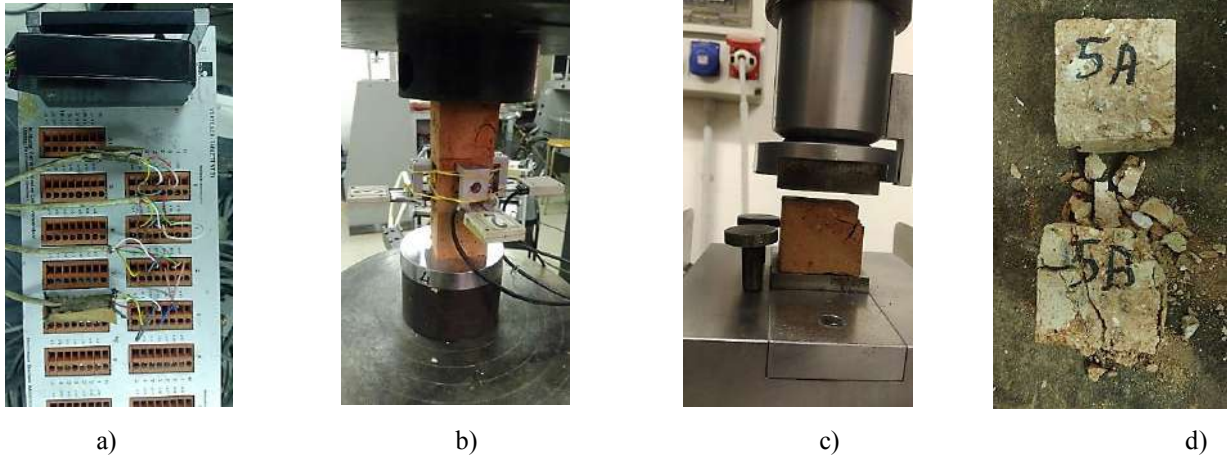


Fig 4.2.10 a) le boîtier de connexion ; b) superposition des cubes et mise en place des extensomètres ; c) écrasement du cube ; d) cube après écrasement (Source : auteur)

4.2.1.3.2 Système Optique par vidéo caméra

Le système optique (OS) est une technique très intéressante permettant l'acquisition de diverses données au-delà des propriétés de déformabilité des matériaux (module de Young, coefficient de Poisson) habituellement enregistrées par des extensomètres standards. Cette technique permet de mesurer des déplacements sur des échantillons bas qui ne répondent pas aux normes et exigences actuelles, telles que les matériaux historiques.

Les marqueurs (points de référence) sont collés comme première étape sur le cube central sur une seule face. Nous avons sélectionné 9 points en respectant dans la mesure du possible la même distanciation entre eux et en évitant les extrémités (5 mm au moins des bords) comme le montre la (Fig 4.2.11 a). Les distances entre les points de référence des extrémités (Fig 4.2.11 b) sont nécessaires lors de l'opération de conversion des résultats (des pixels aux micromillimètres) (Section 4.2.1.4.3.1).

Les marqueurs à utiliser sont des points noirs imprimés sur du papier blanc (pour obtenir le meilleur contraste possible), leur taille doit être proportionnelle au FoV (Field of View).

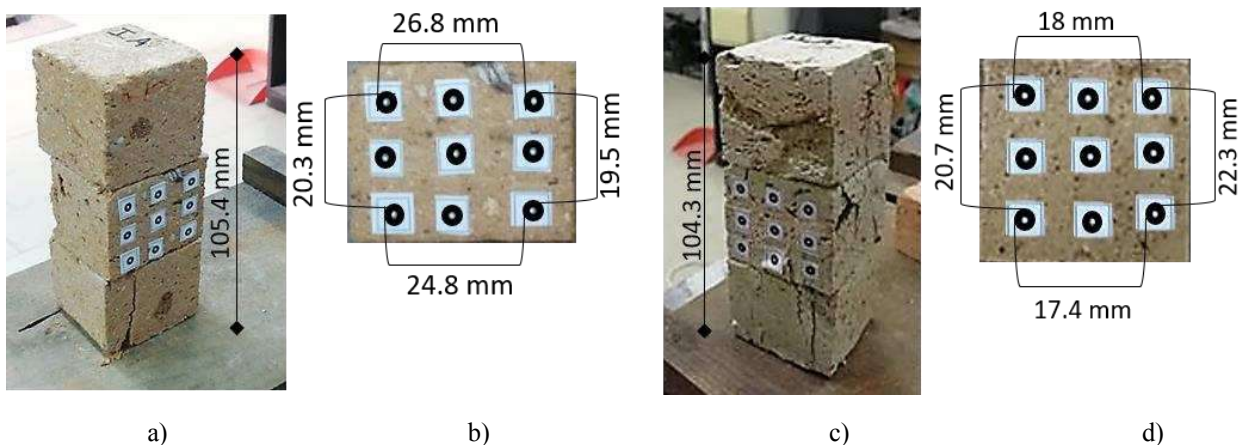


Fig 4.2.11 a) et c) collage des points de référence respectivement pour les briques 6 et 7 ; b) et d) distances entre les points de référence respectivement pour les briques 6 et 7 (Source : auteur)

Comme deuxième étape, les cubes sont positionnés entre les plaques de la machine d'écrasement entourées de quatre extensomètres (Fig 4.2.12) de « type B » (Fig 4.2.1 b) qui sont connectés à la machine de contrôle (Fig 4.2.14). Les résultats enregistrés par les extensomètres seront comparés à ceux générés par le système optique (Section 4.2.1.4.3.3).



Fig 4.2.12 Positionnement des cubes dans la machine d'écrasement (Source : auteur)

La caméra vidéo est montée sur un trépied et positionnée de sorte que le champ de vision (*Field of View*) soit fixé sur le cube central. Il est directement connecté à l'ordinateur portable via l'interface USB comme indiqué sur la Fig 4.2.14. Il est composé de deux éléments :

1. Le capteur : une caméra vidéo monochrome haute résolution (Mod: uEye UI-2280SE-M) avec un type de capteur: CCD 2448 x 2048 Pixel (5,01 mégapixels), obturateur global électronique, cadence maximale: 6,5 / sec (IDS).
2. L'objectif 28 mm (grand angle). Il est essentiel que la distance entre la caméra vidéo et les échantillons reste constante pendant le test, ainsi que l'intensité d'éclairage.



Fig 4.2.13 Positionnement de la vidéo-caméra (Source : auteur)

L'OS permet la localisation de marqueurs dans un système de coordonnées cartésien à l'aide d'une caméra vidéo haute résolution et l'analyse des images capturées. Les déplacements référencés à l'image initiale en utilisant les points fixes comme cible, sont enregistrés sur la base d'une acquisition continue contrôlée par un programme non commercial *AnalisiImmagine_uEye*. Ce dernier est basé sur un instrument virtuel développé avec la plate-forme LabView Vision pour l'acquisition du chargement (application de force) et le traitement d'image. Le système permet de fixer des coordonnées absolues et d'extrapoler des informations telles que les vecteurs de déplacement de chaque point mesuré et les déplacements relatifs entre les points les plus représentatifs de la face concernée (Cucchi, et al., 2012). Nous proposons le schéma suivant (Fig 4.2.14) pour illustrer l'installation de l'OS. Il est composé de 7 éléments interconnectés entre eux : (1) Les échantillons : dans notre cas les trois cubes de brique, avec des points de référence collés sur la face centrale. (2) La machine d'écrasement : ajustée en fonction de la hauteur exacte des échantillons sur laquelle sont fixés les extensomètres afin de mesurer le déplacement total correspondant aux trois cubes. (3) Unité d'acquisition des données : elle permet de connecter les extensomètres à la machine de contrôle et de transmettre les déplacements mesurés. (4) La machine de contrôle : elle permet le contrôle du test de compression (vitesse, type et intensité de la charge). Elle permet aussi de visualiser les courbes de déformation (contrainte / déformation) obtenues grâce aux extensomètres. (5) La Vidéo caméra haute résolution : elle est fixée et réglée de manière que le champ de vision soit focalisé sur le cube central contenant les repères, elle est connectée à l'ordinateur portable. (6) L'ordinateur (portable dans notre cas) : permet le contrôle de la caméra vidéo grâce à un programme prédéfini (résolution, acquisition d'images ...) et de fournir toutes les informations relatives aux déplacements des points de référence. (7) Les projecteurs : qui permettent d'assurer un éclairage suffisant lors de l'opération d'acquisition.

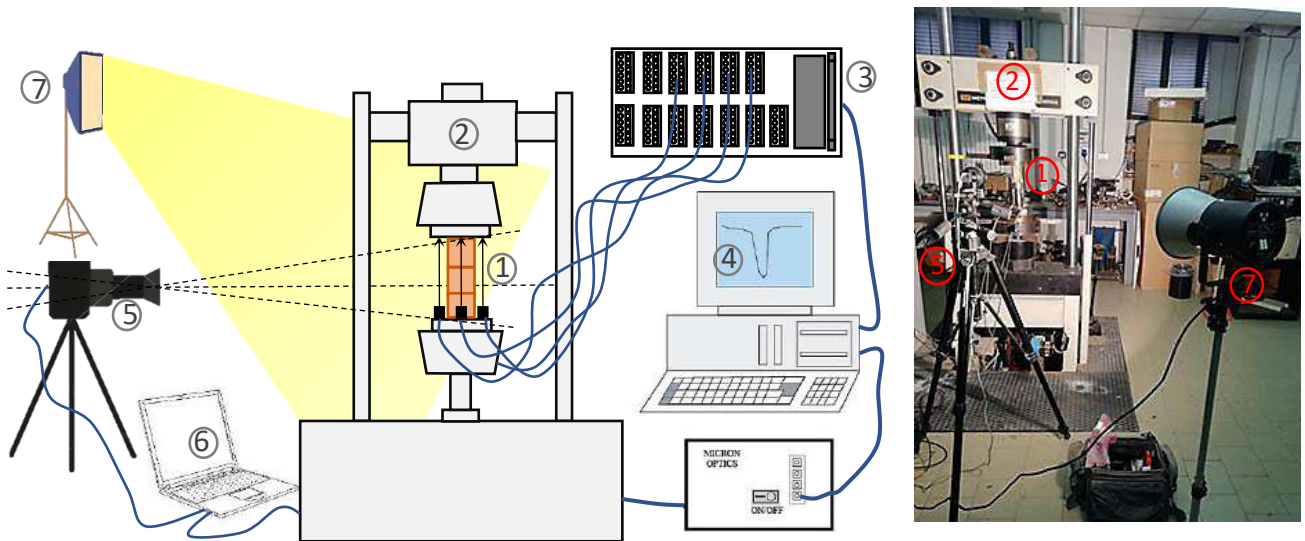


Fig 4.2.14 Installation du Système Optique (Source : auteur)

Spécimens, 2) machine d'écrasement, 3) machine d'acquisition des données, 4) machine de contrôle, 5) vidéo-caméra, 6) laptop, 7) projecteur.

Le programme non commercial développé *AnalisiImmagine_uEye* connecté à la Vidéo caméra (objectif) fournit le déplacement de chaque point de référence en pixels qui sont ensuite convertis en micromillimètres. Le processus à entreprendre est détaillé dans la [Section 4.2.1.4.3.1](#).

Une acquisition simultanée des données se fait dans la machine de contrôle pour les déplacements enregistrés par les extensomètres, et l'ordinateur portable pour ceux enregistrés par le Système Optique. L'acquisition des données du système d'exploitation vidéo s'effectue comme suit :

1. Un système cartésien initial de coordonnées (X, Y) est créé dont l'origine (0,0) correspond au coin supérieur gauche de l'image de référence du cube du milieu comme indiqué dans (Fig 4.2.15 a/d). Ce système permettra d'indiquer la position et de mesurer le déplacement de chaque point de référence.
2. Nous sélectionnons manuellement parmi les 9 marqueurs un point qui sera considéré comme référence pour le programme (Fig.9a a). Grâce aux techniques de correspondance des modèles (motifs) qui incluent une corrélation croisée normalisée développée dans le logiciel, les 8 autres points sont détectables automatiquement et une référence numérique leur est attribuée de 1 à 8. Cela représente l'une des méthodes courantes pour retrouver un modèle (motif) dans une image. Une coordonnée locale cartésienne (x, y) est attribuée à chaque point de référence qui permettra de tracer son mouvement (Fig 4.2.15 b/e) à une échelle visible.
3. Une fois que tous les points de référence ont été détectés et calibrés correctement, le chargement peut commencer. Grâce à l'algorithme de traitement d'image contenu dans le programme, le déplacement des points de référence le long des axes est calculé en se référant à l'origine (Fig 4.2.15 c/f).

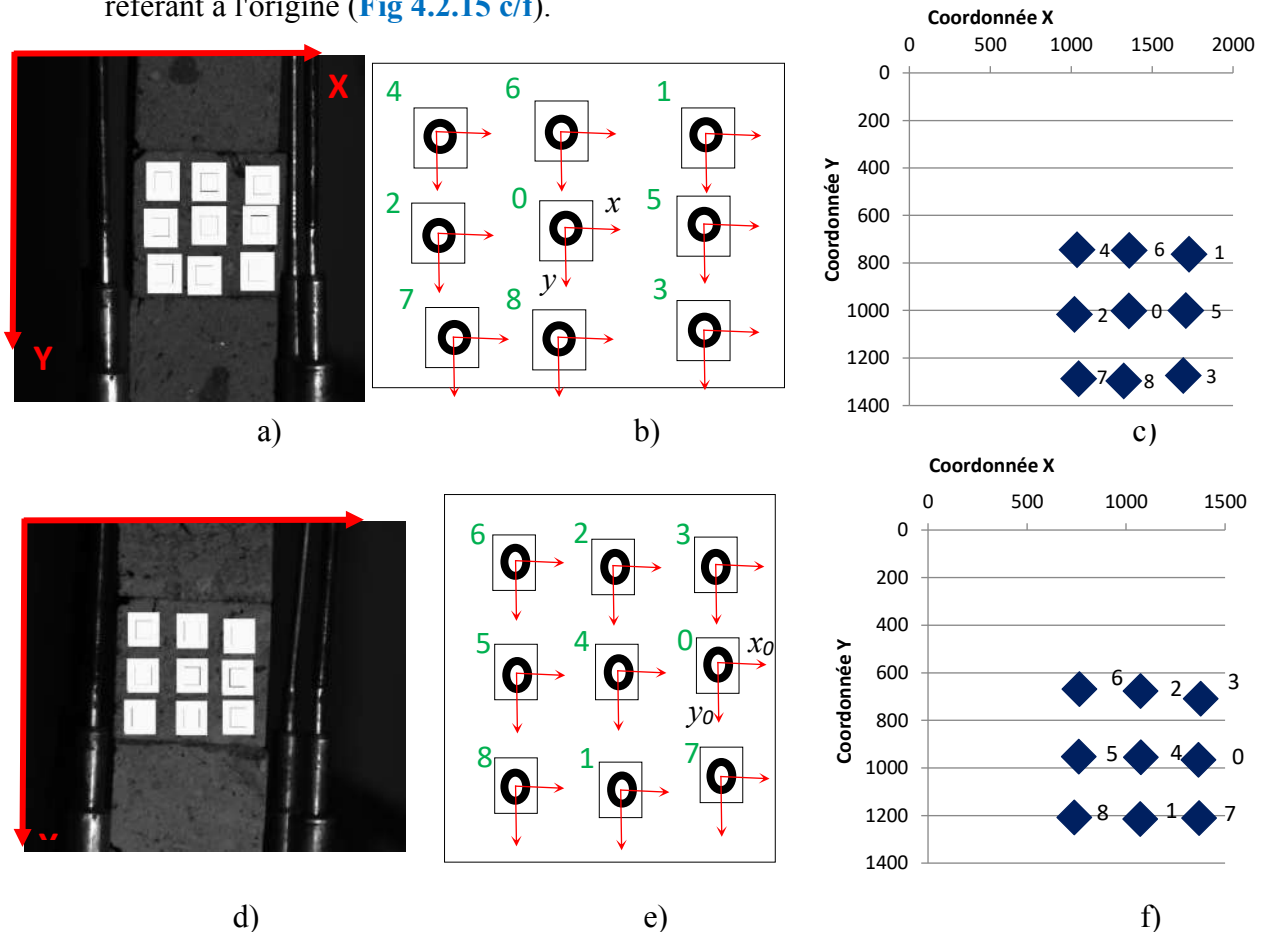


Fig 4.2.15 a) et d) Coordonnées cartésiennes initiales du système (X, Y) respectivement pour les briques 6 et 7, b) et e) marques sélection respectivement pour les briques 6 et 7, c) et f) coordonnées cartésiennes initiales pour les briques 6 et 7 (Source: auteur)

Une synchronisation du chargement avec les mouvements des points de référence est également assurée par la connexion entre l'ordinateur portable et la machine d'écrasement (**Fig 4.2.14**). Le chargement est visible sur l'interface du programme grâce à l'instrument virtuel développé avec la plateforme LabView Vision. Une sauvegarde manuelle continue et répétitive est recommandée pour éviter toute sorte de perte des données lors de l'acquisition.

Sur l'interface du programme, nous pouvons visualiser comme le montre la **Fig 4.2.16 a** ce qui suit : a) marqueur unique et zone de recherche sélectionnée, b) les marqueurs détectés, c) les déplacements horizontaux absolus le long de l'axe X, d) les déplacements verticaux absolus le long de l'axe Y, e) les déplacements relatifs entre les points sélectionnés, f) les vecteurs de mouvement des points de référence, g) les valeurs de déplacement / force.

Les données extraites de la machine de contrôle sont présentées comme indiqué sur la **Fig 4.2.16 b** comme suit : a) les déplacements obtenus par les 4 extensomètres, b) la courbe force / déplacement des 4 extensomètres, c) la durée de l'essai.

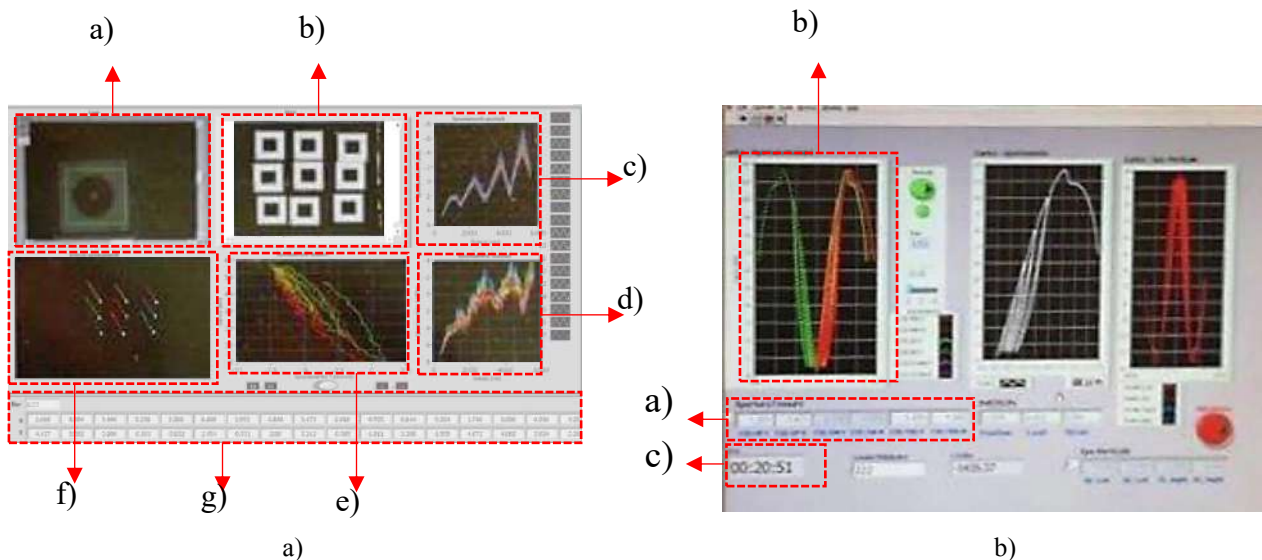


Fig 4.2.16 a) interface du programme du SO ; b) interface du programme de la machine de control (Source : auteur)

4.2.1.4 Résultats

4.2.1.4.1 Module d'Young des briques en terre cuite par application d'extensomètres de type A (DD1)

Nous avons réalisé 05 tests sur 03 briques en terre cuite (N° 1/3/4) pour déterminer le module de Young. Nous obtenons 04 graphes pour chaque test correspondant aux 4 extensomètres. Toutefois, le nombre de briques utilisé est le minimum exigé pour la validation de la valeur moyenne du module de Young.

Les groupes de cubes sont codés comme suit : 1ADF, 1BCE, 3ABC, 3FDE, 4BDE, dans lesquels le chiffre correspond au numéro de brique et les lettres correspondent au code du petit cube.

Pour chaque test, nous avons appliqué 3 charges cycliques croissantes dont chacune représente 30% de la résistance à la compression de chaque brique.

Afin de déterminer le module de Young général, nous avons procédé comme suit :

1. Les courbes de charge cyclique contrainte / déformation correspondant aux quatre extensomètres (Ext) (**Fig 4.2.17 a/c**) ainsi que la courbe moyenne sont tracées (**Fig 4.2.17 b/d**).
2. A partir de la courbe moyenne, une interpolation linéaire de la courbe enveloppe du cycle de charge correspondant à un chargement incrémental entre 30 et 60% de la résistance à la compression est appliquée afin de déterminer le module de Young (**Fig 4.2.17 b/d**).
3. Nous affichons les résultats du module de Young obtenu pour toutes les briques (E_i) dans le **Tab 4.2.3**. En appliquant la formule (1), le module de Young général (E) obtenu est égal à 4440 MPa.

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (1)$$

$\sigma_2 - \sigma_1$: est un incrément de contrainte en MPa avec un coefficient de corrélation égal ou supérieur à 0,99,

$\varepsilon_2 - \varepsilon_1$: est l'incrément de déformation en (mm / mm) correspondant à $(\sigma_2 - \sigma_1)$

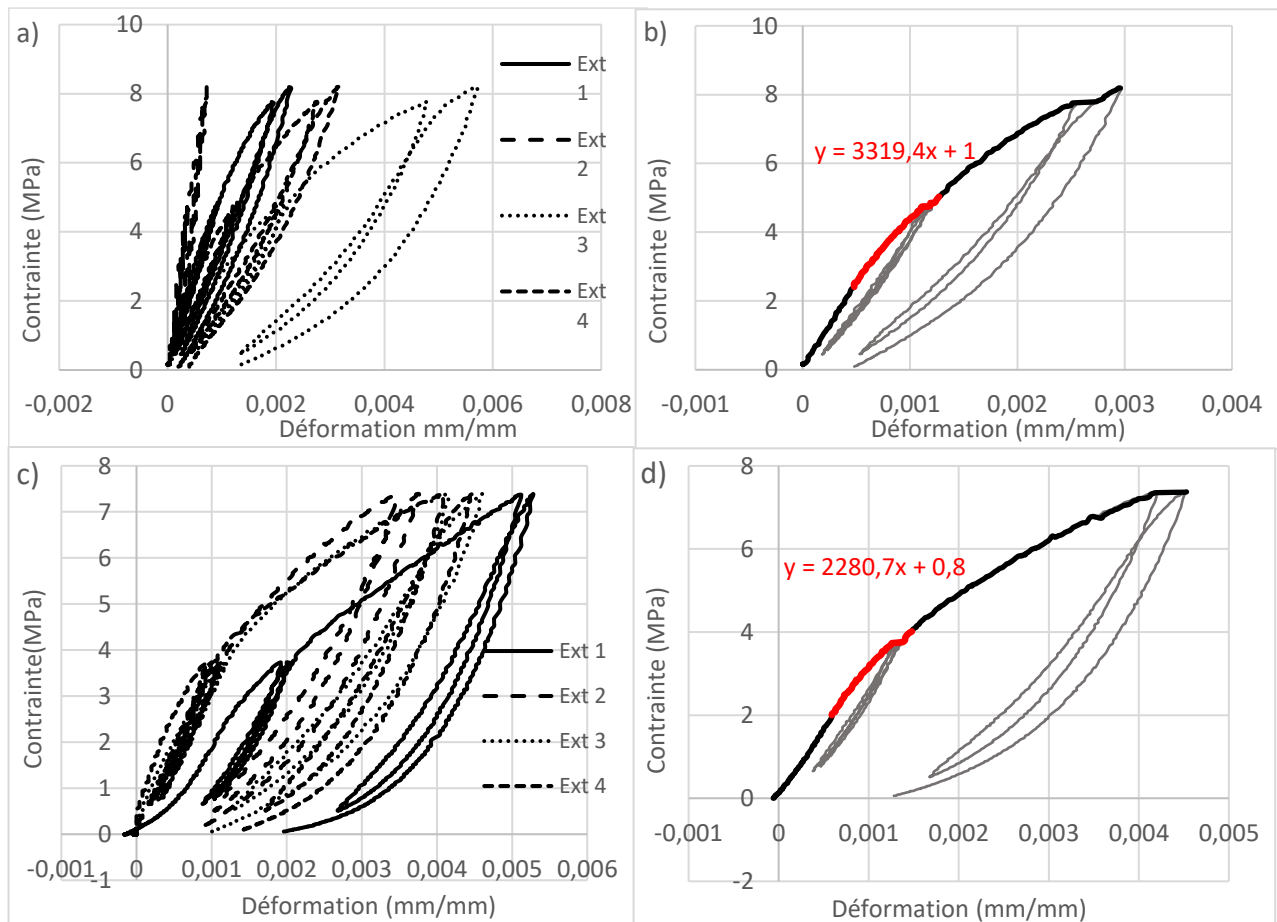


Fig 4.2.17 Calcul du module de Young des deux échantillons (3ABC) et (4BDE) (Source : auteur).

a) courbe contrainte / déformation avec un chargement cyclique (éprouvette 3ABC), b) calcul du module de Young (éprouvette 3ABC), c) courbe contrainte / déformation avec un chargement cyclique (éprouvette 4BDE), d) calcul du module de Young (spécimen 4BDE)

Echantillon code	1ADF	1BCE	3ABC	3FDE	4BDE	Brique 6 (OS)	Brique 7 (OS)
Ei (MPa)	6660	7810	3320	5100	2280	1440	/
E (MPa)	4440						

Tab 4.2.3 Le module de Young obtenu par les extensomètres de type A (Source : auteur)

4.2.1.4.2 Résistance à la compression des briques en terre cuite

La résistance à la compression des briques en terre cuite est calculée à partir des résultats obtenus de chaque petit cube (Ci) après avoir obtenu des données relatives au module de Young, les résultats de compression sont affichés dans le **Tab 4.2.4**.

N°	R	D (mm)		S (mm ²)	Fi (N)	Ci (MPa)
		L	l			
1	1A	40.8	40.8	1664.6	/	/
	1B	40.7	40.6	1652.4	18000	10.9
	1C	40.6	40.3	1636.2	18300	11.2
	1D	39.7	40.1	1592	/	/
	1E	41	41.6	1705.6	21500	12.6
	1F	41.1	41.8	1718	24700	14.4
	1G	38.2	38	1451.6	10300	7.1
	1H	40	37.8	1512	2400	1.6
2	2A	40.6	41.4	1680.8	13200	7.9
	2B	40.7	40.1	1632.1	14300	8.8
	2C	38.2	40.4	1543.3	5800	3.8
3	3A	39.4	39	1536.6	28100	18.3
	3B	39.7	38.8	1540.4	27500	17.9
	3C	40.3	39.6	1595.9	32300	20.2
	3D	40	40.8	1632	30600	18.8
	3E	39.2	40.8	1599.4	32400	20.2
	3F	41	39.5	1619.5	33600	20.7
4	4A	37.4	40	1496	25800	17.2
	4B	40.6	40.1	1628.1	30000	18.4
	4C	40.4	40.6	1640.2	31800	19.4
	4D	39.4	40.7	1603.6	25100	15.7
	4E	40.3	40.8	1644.2	27600	16.8
5	5A	39.6	40.3	1595.9	31800	19.9
	5B	40	39.3	1572	12800	8.1
	5C	40.6	39.6	1607.8	33500	20.8
	5D	40.2	39.6	1591.9	32000	20.1
	5E	40.6	41.8	1697.1	41000	24.2
	5F	41.4	42.2	1747.1	45000	25.8

Tab 4.2.4 Résultat du test de compression (Source : auteur)

Depuis le **Tab 4.2.4**, nous constatons ce qui suit :

1. Les résultats de compression de la deuxième brique (2A, 2B et 2C) sont très faibles par rapport aux autres résultats d'échantillons avec une moyenne de 6,8 MPa (62% de moins que la moyenne générale).
2. Les résultats de compression des échantillons 1G et 1H représentent également un résultat faible par rapport aux autres éprouvettes appartenant à la 1ère brique (65% de moins que la moyenne obtenue pour la 1ère brique).
3. Les résultats de compression des échantillons 1A et 1D n'ont pas été obtenus en raison de la présence d'anomalies (déformations).
4. Le résultat de compression de l'échantillon 5B représente également un résultat très faible par rapport aux échantillons appartenant à la 5ème brique (69% de moins que la moyenne obtenue pour la même brique). Les résultats de tous les échantillons cités ci-dessus n'ont pas été considérés car ils pourraient fausser la valeur moyenne de résistance à la compression.
5. Enfin, la résistance à la compression obtenue pour la 6ème et 7ème brique est focalisée uniquement sur le cube central du test par OS (cubes 6B et 7B) qui ne peut être représentatif de l'ensemble des briques.

La résistance moyenne à la compression est calculée pour chaque brique (f_{ci}), nous présentons dans le **Tab 4.2.5** la moyenne générale (f_c) de la résistance à la compression.

N°	F_{ci} (MPa)	F_c (MPa)
1	12.3	17.8
2	/	
3	19.4	
4	17.5	
5	22.1	
6	/	
7	/	

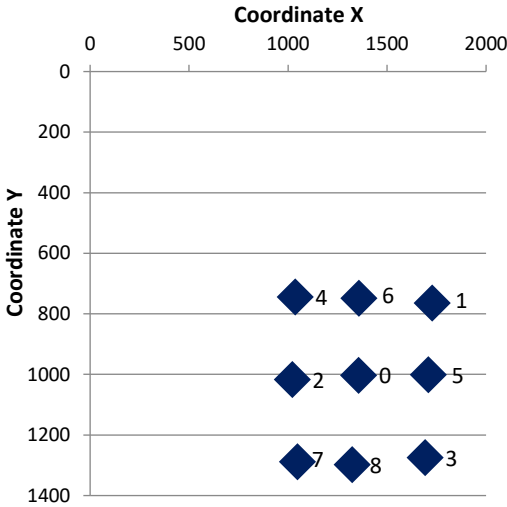
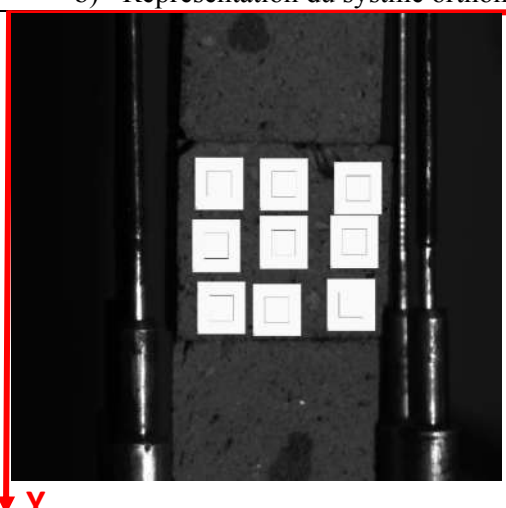
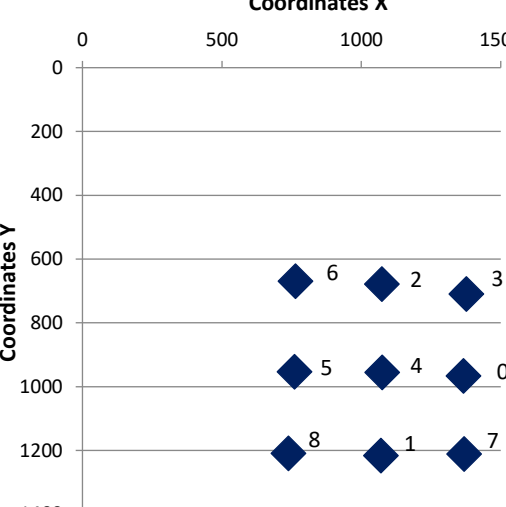
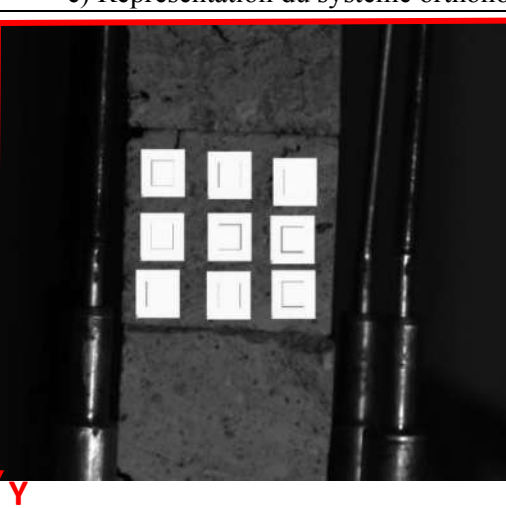
Tab 4.2.5 Moyenne générale de la résistance à la compression des briques en terre cuite (Source : auteur)

4.2.1.4.3 Système optique par Vidéo caméra

4.2.1.4.3.1 Des pixels aux micromillimètres: module de Young et coefficient de Poisson

A la fin du test de compression, les données fournies par l'OS se présentent sous la forme de déplacements en pixels correspondant à chaque point selon X et Y. Il faut tenir compte d'un certain nombre d'étapes pour convertir les pixels en millimètres avant de tracer la courbe de déformation élastoplastique des cubes de brique. Nous appliquons les mêmes étapes pour les deux tests appliqués sur les deux briques (6 et 7).

Étape 1 : Reproduire sous forme tabulaire les coordonnées cartésiennes (x, y) de chaque point suivies d'une représentation dans un repère orthonormé des zones sélectionnées (cubes 6B, 7B) (**Tab 4.2.6**). Pour une meilleure optimisation lors de la localisation et du suivi des marqueurs, de petites zones d'intérêt sont définies autour de chaque point.

Echantillon	Points	Coordonnées	
		x_i	y_i
6	0	1356.402	1002.387
	1	1727.378	763.9589
	2	1020.714	1016.693
	3	1692.661	1274.306
	4	1035.162	744.3299
	5	1709.041	1000.797
	6	1357.713	747.8727
	7	1046.396	1287.916
	8	1323.884	1297.035
a) Coordonnées Cartésiennes			
			
b) Représentation du système orthonormé			
			
c) Définition des zones de marques			
7	0	1365.486	965.999
	1	1070.230	1215.891
	2	1073.032	677.941
	3	1375.693	709.313
	4	1074.079	955.408
	5	760.257	953.502
	6	763.771	669.480
	7	1367.968	1211.039
	8	737.969	1208.987
d) Coordonnées Cartésiennes			
			
e) Représentation du système orthonormé			
			
f) Définition des zones de marques			

Tab 4.2.6 Étape 1 de la conversion des résultats (Source : auteur)

Étape 2 : Cette étape consiste à calculer le coefficient de conversion (k). Grâce aux coordonnées cartésiennes données par le **Tab 4.2.6**, nous calculons les trames verticales et horizontales entre les points des extrémités en pixels (dpi) comme indiqué dans le **Tab 4.2.7**.

Sur la base des mesures précédemment effectuées en millimètres (dmi) (**Fig 4.2.11**), un coefficient de conversion est alors défini pour chaque trame (ki) en appliquant le rapport suivant : $k_i = dmi / dpi$.

Une moyenne arithmétique K est alors définie : $K = \frac{\sum_{i=1}^n k_i}{n}$

Echantillon 6							Echantillon 7						
			Dpi (Pixels)	Dmi (mm)	Ki	K				Dpi (Pixels)	Dmi (mm)	Ki	K
Trame	Verticale	y6 - y8	549.1625	21.5	0.0392	0.0389	Trame	Verticale	y3 - y7	501.7258	20.3	0.0415	0.0413
		y4 - y7	543.5861	21.1	0.0388				y1 - y2	537.949	22.3	0.0405	
		y3 - y1	510.3469	19.5	0.0382				y6 - y8	445.2158	20.7	0.0465	
	Horizontale	x2 - x5	688.3271	27.1	0.0394			Horizontale	x8 - x7	629.9995	25	0.0397	
		x3 - x7	646.2651	25.3	0.0391				x5 - x0	605.2291	24.5	0.0405	
		x1 - x4	692.2158	26.8	0.0387				x3 - x6	611.9225	24	0.0392	

Tab 4.2.7 Calcul du coefficient de conversion (Source : auteur)

Étape 3 : Toutes les coordonnées obtenues en pixels sont donc converties en millimètres comme expliqué à l'étape 2. Pour chaque point de référence (i), on calcule le déplacement effectué à chaque instant (Ti) du test en soustrayant les coordonnées initiales ($\Delta li = li - li0$).

On détermine alors le déplacement de chaque trame ($\Delta l_{y_i-y_i'}$). On définit la déformation ($\epsilon_{y_i-y_i'}$) en appliquant la formule (1) :

$$\epsilon_{y_i-y_i'} = \Delta l_{y_i-y_i'} / l_{y_i-y_i'}(0) \quad (1)$$

Nous proposons dans le **Tab 4.2.8** une application sur une trame (y4-y7) appartenant à l'échantillon I afin d'illustrer plus clairement cette étape.

Echan I	T0(s)	T1(s)	T2(s)	T3(s)	T4(s)	Tn(s)
y4 (pixels)	744.329	744.374	743.097	743.117	743.067	
y4 (mm)	28.954	28.956	28.906	28.907	28.905	
y7 (pixels)	1287.916	1287.981	1286.407	1286.427	1286.425	
y7 (mm)	50.099	50.102	50.041	50.042	50.042	
Δl_{y4} (mm)	0	-0.00172	0.04794	0.04717	0.04909	
Δl_{y7} (mm)	0	-0.00256	0.05868	0.05791	0.05798	
Δl_{y4-y7} (mm)	0	-0.00084	0.01075	0.01074	0.00889	
ϵ_{y4-y7} (mm/mm)	0	-0.00004	0.00051	0.00051	0.00042	
ϵ_{y4-y7} ($\mu\text{m}/\text{mm}$)	0	-0.03995	0.50930	0.50906	0.42128	

Tab.4.2.8 Étape 3 Calcul de la déformation (ϵ) sur un exemple de trame (y4-y7) (Source : auteur)

Étape 4 : Une courbe de contrainte / déformation est tracée pour chaque trame verticale. La moyenne des trois trames verticales est calculée afin de tracer la courbe élasto-plastique issue du test de compression. La courbe contrainte / déformation avec chargement cyclique est convertie en un chargement monotone (**Fig 4.2.18**) et (**Fig 4.2.19**).

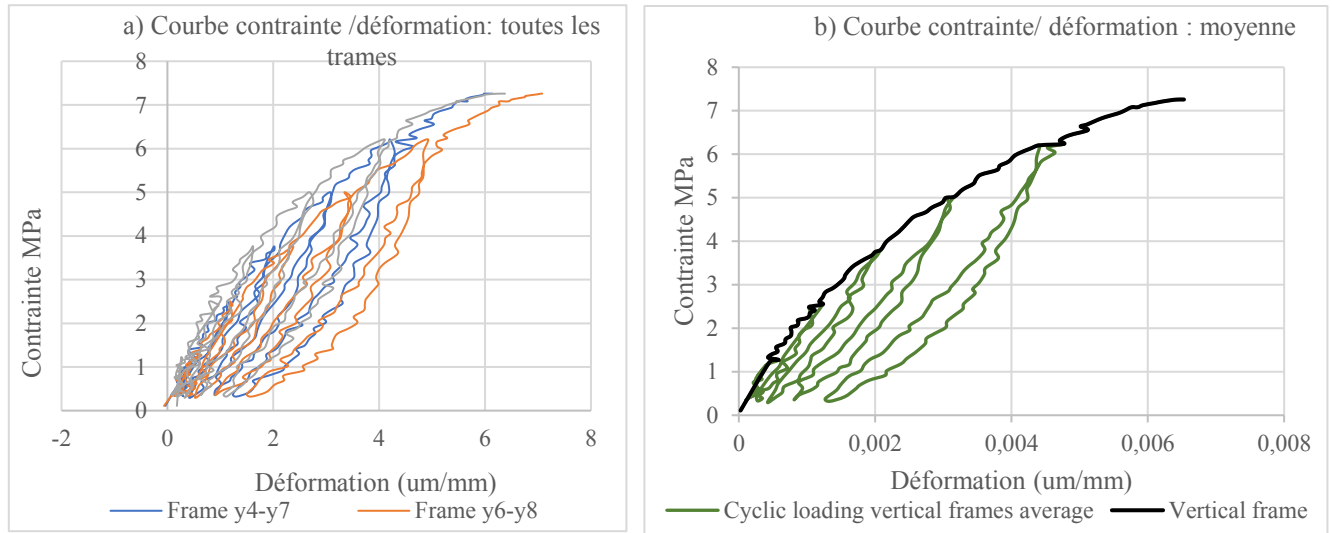


Fig 4.2.18 Courbe élasto-plastique contrainte / déformation de l'échantillon 6 (Source : auteur)

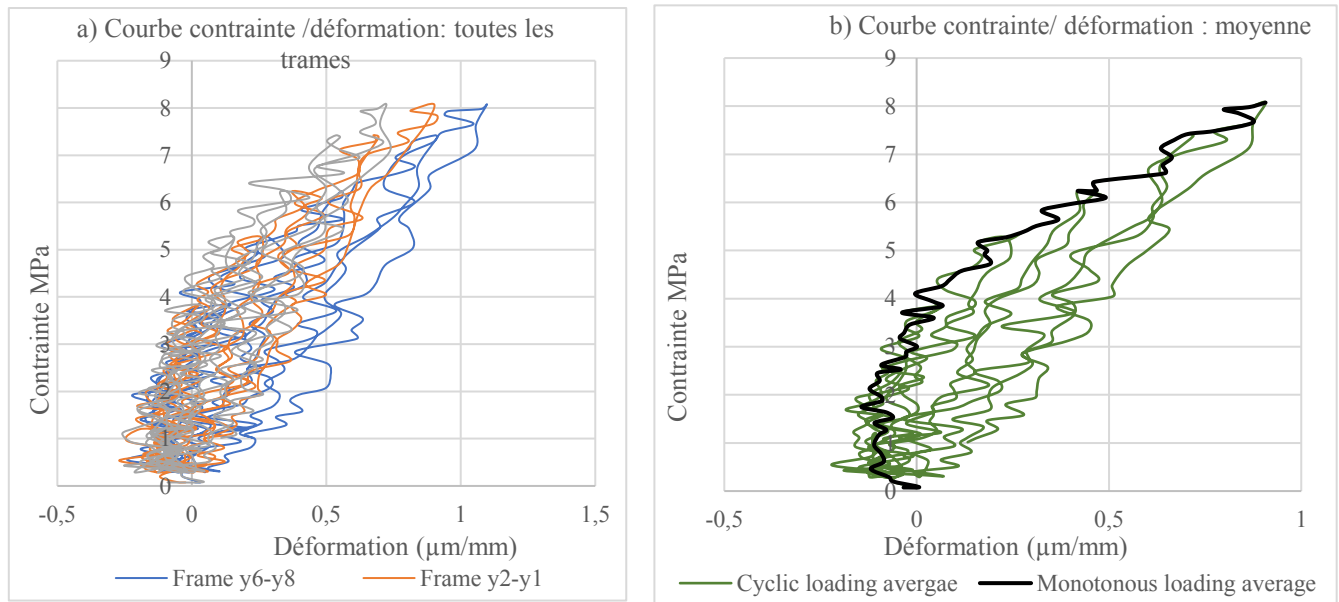


Fig 4.2.19 Courbe élasto-plastique contrainte / déformation de l'échantillon 7 (Source : auteur)

Étape 5 : Elle consiste à déterminer le module de Young (EOS) à partir de la **Fig 4.2.18** correspondant au premier échantillon en utilisant soit : 1) la courbe de tendance et affichage de la formule sur le graphique à partir des outils de traçage des courbes disponibles dans Excel, 2) soit en appliquant la formule (2) (méthode analytique) telle que recommandée par les normes (BSI, 1991), (BSI, 2012) et illustrée dans (Fig 4.2.20). Les deux méthodes conduisent au même résultat.

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \quad (2)$$

$\sigma_2 - \sigma_1$: est un incrément de contrainte en MPa avec un coefficient de corrélation de 0,99 ou mieux,
 $\epsilon_2 - \epsilon_1$: est l'incrément de déformation en (mm / mm) correspondant à $(\sigma_2 - \sigma_1)$

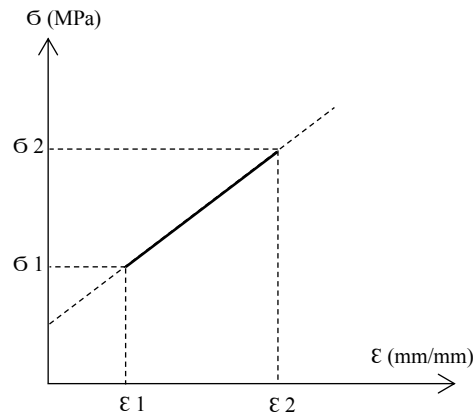


Fig 4.2.20 Calcul du module de Young en utilisant la méthode conventionnelle (Source : (BSI, 1991))

Le chargement cyclique ne permet pas le traçage de la droite (la pente) qui passe par l'origine servant à la détermination du module de Young à cause des microfissures qui s'amorcent et qui provoquent des déformations irréversibles.

La courbe contrainte / déformation de l'échantillon 7 prend une forme non conventionnelle. Pour cette raison, nous nous contentons des résultats relatifs à l'échantillon 6.

Étape 6 : Sur la base des résultats obtenus concernant la déformation des trois trames horizontales, la courbe contrainte / déformation est tracée mais pour déterminer cette fois ci le rapport de Poisson (ν). Nous présentons dans la Fig 4.2.21 la déformation longitudinale / verticale (ϵ_L) ainsi que la déformation transversale / horizontale (ϵ_T) des trames jusqu'à la fin de la phase plastique.

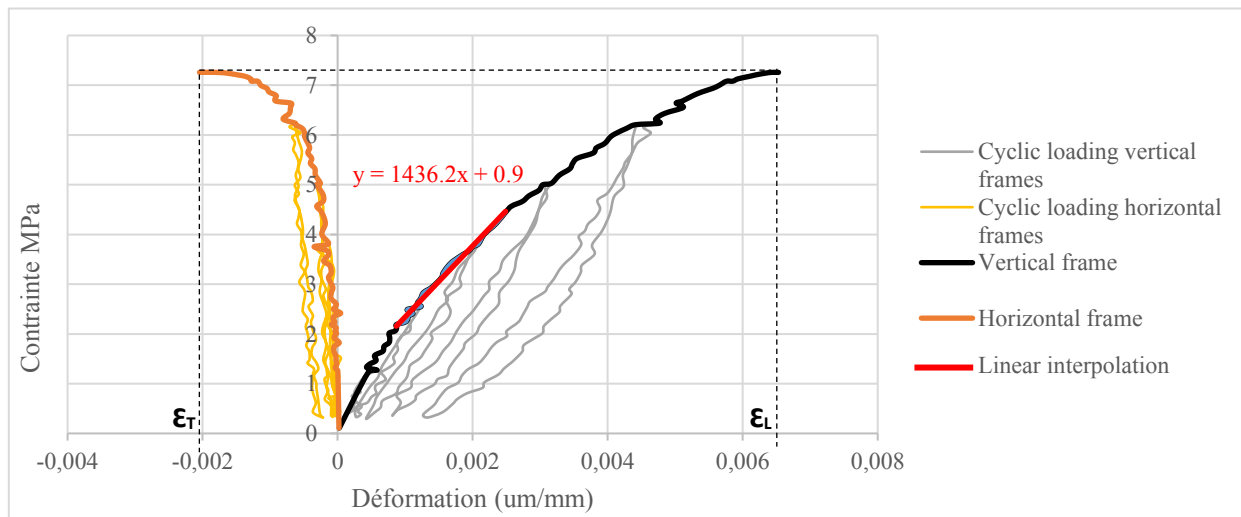


Fig 4.2.21 Détermination du module de Young et du rapport de Poisson par le OS (Source : auteur)

Le coefficient de Poisson est déterminé en appliquant la formule (3) :

$$\nu = - \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} \quad (3)$$

$$\varepsilon_T = -2,046 \text{ (}\mu\text{m / mm)} \quad \varepsilon_L = 6,531 \text{ (}\mu\text{m / mm)}$$

Le module de Young et le coefficient de Poisson obtenus pour la 6^{ème} brique en utilisant respectivement le OS sont respectivement égaux à $E_6 = 1440 \text{ MPa}$ et $\nu = 0,31$.

4.2.1.4.3.2 Module de Young des briques en terre cuite par application d'extensomètres de type B (LVDT)

Nous présentons dans la Fig 4.2.22 la courbe contrainte / déformation obtenue en utilisant les extensomètres installés de type B comme expliqué dans la Section 4.2.1.1. Le module de Young (Eext) calculé sur la base de la déformation moyenne comme mentionné dans (Section 4.2.1.4.3.1) est égal à 1290 MPa.

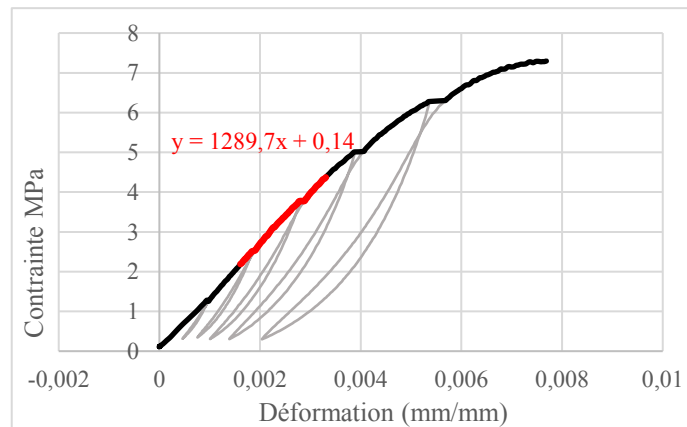


Fig 4.2.22 Module de Young obtenu par les extensomètres de type B lors de l'application du OS (Source : auteur)

4.2.1.4.3.3 Confrontation des résultats : Système Optique VS extensomètre de type B (LVDT)

La comparaison entre les résultats obtenus par le système optique (OS) et ceux obtenus par les extensomètres (EX) montre clairement une différence relativement importante en termes de déformation. En effet, ce résultat est attendu car la force de compression appliquée à ce type d'échantillons est concentrée sur le cube central et beaucoup moins sur les cubes d'extrémités comme expliqué dans la Section 4.2.1.3.1. Les extensomètres amovibles de type B utilisés pour ce test pour les raisons évoquées dans la Section 4.2.1.1, nous permettent de n'avoir que la déformation moyenne le long des trois cubes.

En revanche, le module de Young calculé (Eext) est réduit de 10% par rapport au module de Young calculé par le OS (EOS) (Fig 4.2.23).

Les courbes contrainte / déformation obtenues à partir des deux techniques utilisées ont la même forme avec la même contrainte de rupture égale à $\sigma_{EX} = 7,3 \text{ MPa}$ et $\sigma_{OS} = 7,26 \text{ MPa}$.

Ceci est tout à fait correct car le chargement est contrôlé par la machine d'écrasement qui émet les mêmes informations à la machine de contrôle ainsi qu'au programme du OS (ordinateur portable) (Fig 4.2.14).

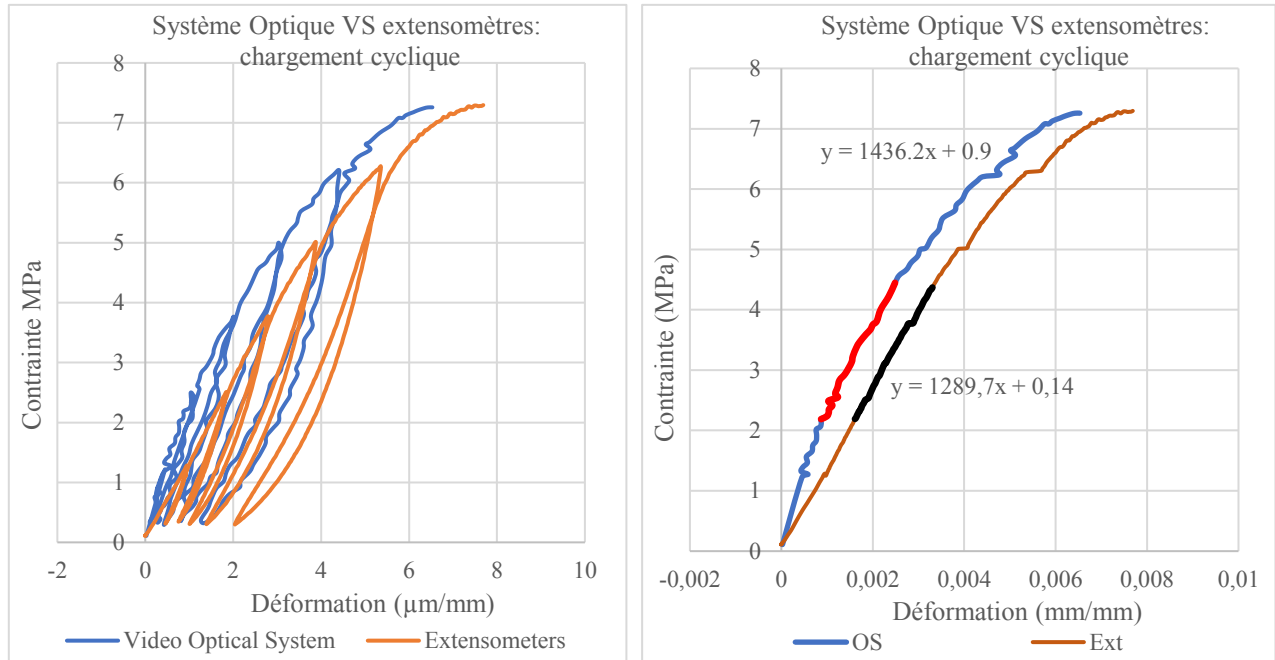


Fig 4.2.23 Courbes de contrainte / déformation : du Système Optique par vidéo Vs les extensomètres de type B
(Source: auteur)

4.2.1.4.3.4 Trajectoire des points de référence

Le Système Optique par vidéo caméra permet d'analyser la trajectoire des points de référence. La Fig 4.2.24 (échantillon 6) et (échantillon 7) montrent les mouvements des points sélectionnés sous un chargement monotone converti. Les schémas représentant les trajectoires des points permettent une interprétation intuitive du comportement des cubes sous une force de compression et montrent des déplacements homogènes en diagonale. Ceci permet d'indiquer une certaine homogénéité dans la composition granulométrique des cubes en terre cuite.

Une application in-situ directe du Système Optique accompagnée d'un test non destructif tel que le Flat Jack permettrait d'obtenir des résultats très intéressants relatif au comportement et au déplacement réel de la maçonnerie sous l'effet de compression.

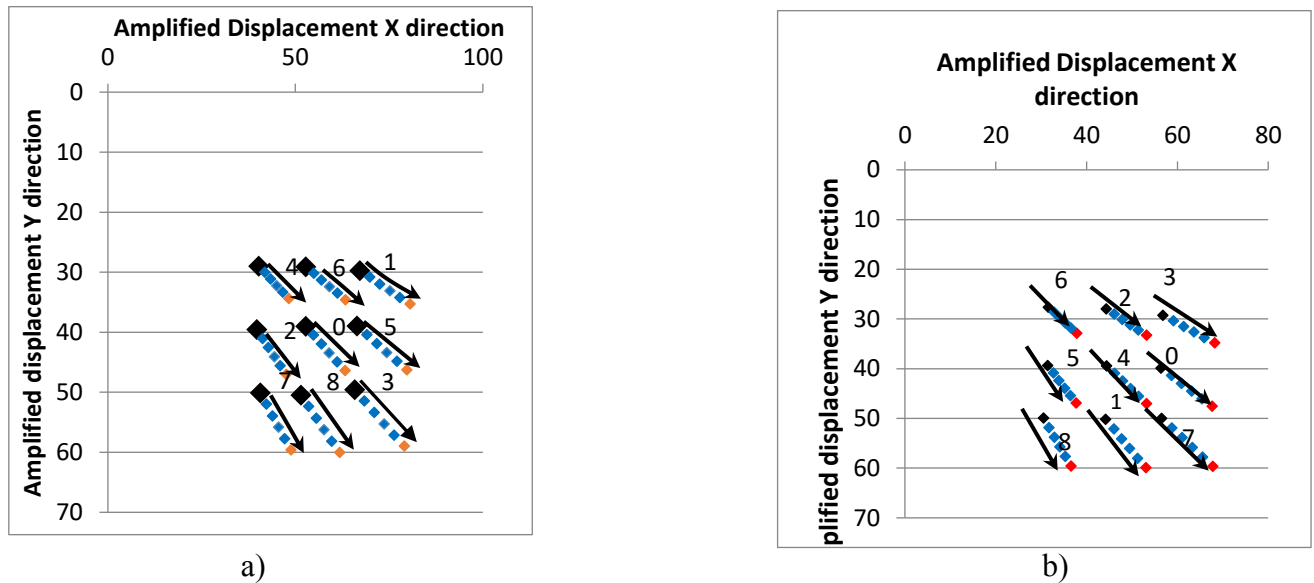


Fig 4.2.24 Trajectoire des points de référence, a) échantillon 6, b) échantillon 7 (Source : auteur)

4.2.1.4.4 Module de Young du bois de *Thuja* par application d'extensomètres de type B (LVDT)

Afin d'obtenir le comportement élasto-plastique du bois de *Thuja*, nous avons utilisé trois extensomètres pour les trois échantillons de bois en respectant les étapes mentionnées dans la [Section 4.2.1.2.2](#). La machine à écraser utilisée pour ce test est limitée, appliquant une force maximale de 100 KN. Pour cette raison, nous avons obtenu deux courbes élastiques contrainte / déformation correspondant aux échantillons 1 et 3 et une seule courbe élasto-plastique jusqu'à la rupture correspondant au second échantillon comme le montre la [Fig 4.2.26](#). Cependant, nous nous basons sur la deuxième courbe obtenue (échantillon 2) pour compléter les données d'entrée (l'input) lors de l'analyse structurelle par Eléments Finis.

Nous montrons dans la [Fig 4.2.25](#) les distances entre les fixateurs (l_{oi}) placés sur les trois échantillons qui seront utilisés lors du tracé des courbes contrainte / déformation.

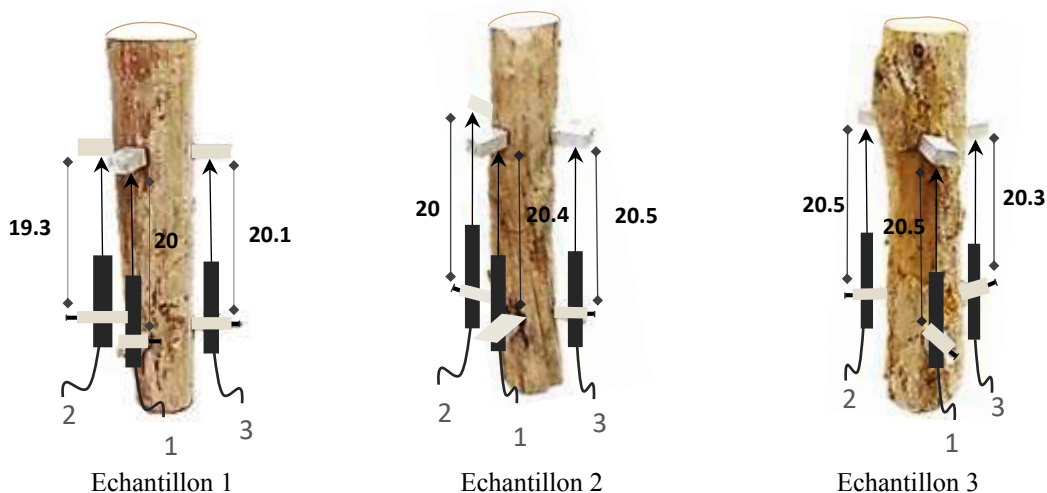


Fig 4.2.25 Distance entre les fixateurs (Source : auteur)

La contrainte est calculée en divisant les forces appliquées (F_i), par la surface (S_i) de chaque échantillon (**Tab 4.2.2**) en respectant la formule (4).

$$\sigma_i = \frac{F_i}{S_i} \quad (4)$$

En revanche, la déformation est déterminée en divisant les déplacements obtenus pour chaque extensomètre (Ext_i) par la distance initiale (l_{0i}) qui lui correspond (**Fig 4.2.26**). Nous retraçons les courbes en convertissant le chargement cyclique en chargement monotone. Le module de Young correspondant à chaque échantillon (E_i) est calculé en utilisant les outils de traçage de courbes disponibles dans Excel et est affiché dans le **Tab 4.2.9** en se basant sur la moyenne des résultats des trois extensomètres. Cette approche fournit un résultat plus représentatif.

Le module de Young général (E_{Thuja}) correspondant au bois de *Thuja* est déterminé en fonction de la moyenne des trois résultats obtenus.

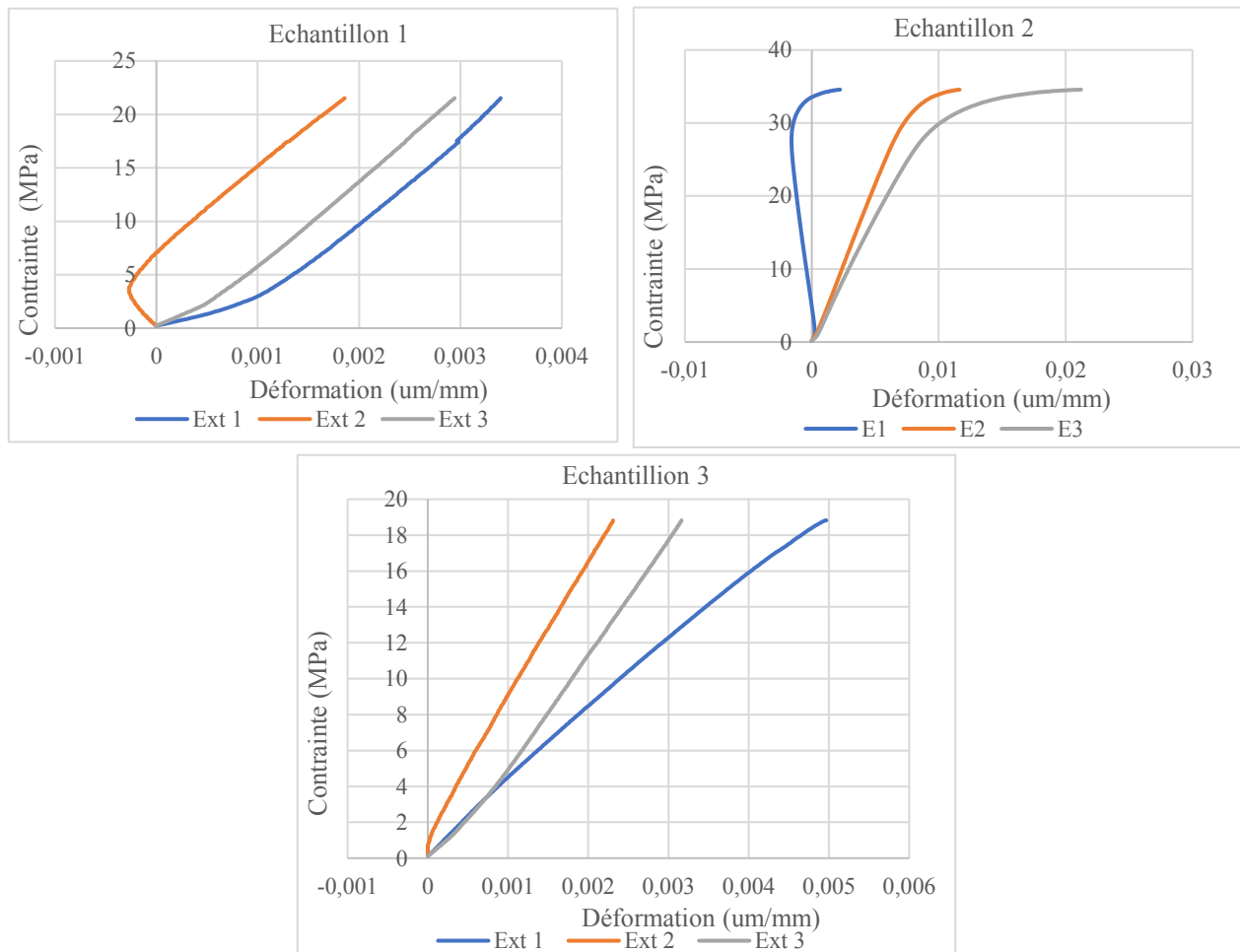
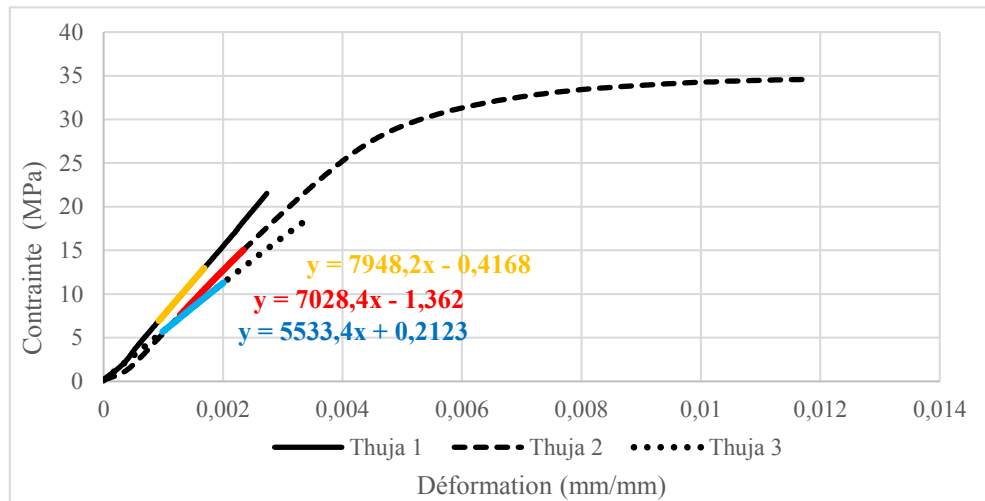


Fig 4.2.26 Courbe contrainte / déformation correspondant aux trois échantillons (Source : auteur)

Fig 4.2.27 Calcul du module de Young du bois de *Thuja* (Source : auteur)

	<i>Thuja 1</i>	<i>Thuja 2</i>	<i>Thuja 3</i>
E_i (MPa)	7950	7030	5530
E_{Thuja} (MPa)	6840		

Tab 4.2.9 Calcul du module de Young du bois de *Thuja* (Source : auteur)

Le collage de certains fixateurs d'extensomètre n'a pas pu être réalisé parfaitement car les éprouvettes disponibles ont été utilisées avec leurs dimensions réelles et présentent plusieurs irrégularités (2^{ème} et 3^{ème} échantillon en particulier) comme expliqué dans la [Section 2.4](#). Pour cette raison, nous remarquons quelques déformations lors du traçage des courbes contrainte / déformation et une variabilité entre les résultats (module de Young) obtenus par les trois extensomètres.

4.2.1.4.5 Résistance à la compression du bois de *Thuja*

La résistance à la compression du bois de *Thuja* est calculée sur la base des résultats obtenus de chaque échantillon (Cti) après obtention des courbes contrainte / déformation. La machine d'écrasement utilisée pour cette étape fournit une charge maximale égale à 600 KN. La hauteur prévue entre les plaques ne permet pas l'insertion d'éprouvette en bois dont la hauteur est égale à 400 mm ([Fig 4.2.28 b](#)). Cependant, les spécimens *Thuja 1* et *Thuja 3* ont été coupés en deux comme le montre la [Fig 4.2.28 a](#). La machine est configurée en insérant la nouvelle hauteur des éprouvettes, la surface de leur sections ainsi qu'une vitesse de chargement égale à 0,5 MPa / s ([Fig 4.2.28 d](#)). La [Fig 4.2.28](#) montre les échantillons après écrasement dont les résultats sont affichés dans le [Tab 4.2.10](#). La résistance à la compression de l'éprouvette *Thuja 2* est obtenue à partir de la courbe contrainte / déformation présentée dans la [Fig 4.2.27](#).

Fig 4.2.28 Processus d'obtention de la résistance à la compression du bois de *Thuja* (Source : auteur)

	Thuja 1		Thuja 3		Thuja2
	Thuja 1 A	Thuja 1B	Thuja 3A	Thuja 3B	/
Hauteur (mm)	196	203	198	201	
Cti (MPa)	36.56	41.93	37.75	40.26	
Moyenne partielle (MPa)	39.24		39		34.57
Moyenne générale (MPa)			37.6		

Tab 4.2.10 Moyenne générale de la résistance à la compression du bois de *Thuja* (Source : auteur)

4.2.2 Discussion

Le module de Young obtenu pour les briques en terre cuite à l'aide des extensomètres de type A (DDI) (4440 MPa) est considérablement élevé. En effet, il dépasse largement la moyenne suggérée par la littérature qui est égale à 2500/3000 MPa. De plus, les briques ont une résistance à la compression élevée de 17,8 MPa par rapport aux valeurs moyennes entre 9 et 20 MPa trouvées dans la littérature (Peirs, 2005) et (Cameran, 1958).

La comparaison entre les résultats obtenus par le Système Optique (OS) et ceux obtenus par les extensomètres (EXT) de type B montre clairement une différence en termes de déformation. En fait, le module Young (E_{EXT}) est réduit de 10% par rapport à celui obtenu par le système optique (E_{OS}). Ce résultat est attendu car les déformations sous effort de compression, sont plus concentrées sur le cube central et beaucoup moins sur les cubes d'extrémités comme expliqué dans la [Section 4.2.1.3.1](#). Les extensomètres amovibles de type B (LVDT) utilisés lors de l'application du OS, permettent uniquement de mesurer la déformation moyenne le long des trois cubes ce qui n'est pas

représentatif des déformations réelles. Nous prenons en considération les résultats obtenus par le Système Optique lors du calcul du module de Young général (E) (**Tab 4.2.3**).

Les courbes contrainte / déformation obtenues à partir des deux techniques utilisées ont la même forme avec la même contrainte de rupture qui est égale à $F_{EXT} = 7,3$ MPa et $F_{OS} = 7,26$ MPa. Ceci est tout à fait correct car le chargement est contrôlé par la machine d'écrasement qui transmet les mêmes informations à la machine de contrôle et au logiciel du OS (ordinateur portable) (**Fig 4.2.14**).

A travers des résultats affichés, on note dans le **Tab 4.2.9** un résultat décroissant du module de Young de *Thuja* correspondant aux trois échantillons, de 7950 à 5530 MPa. Ce résultat est attendu car les trois spécimens sélectionnés ont des degrés de conservation différents (**Tab 2.4.1**). Le module de Young obtenu pour les trois échantillons de bois *Thuja* avec une moyenne de 6840 MPa indique une bonne résistance à la compression se rapprochant de la moyenne indicative de 7700 MPa suggérée dans la littérature (**UNI, 2016**) avec 3% de plus pour le 1^{er} échantillon, 9 % de moins pour le 2^{ème} et 28% de moins pour le 3^{ème}.

La mise en place d'un extensomètre sur chaque face d'échantillon dans le cas d'une éprouvette cubique, ou respectant une distribution angulaire précise dans le cas d'une éprouvette cylindrique (120 ° dans notre cas), permet d'obtenir un résultat final représentatif des différentes déformations enregistrées dans tous les sens.

4.2.3 Conclusion

L'analyse des matériaux de construction historiques est une étape essentielle pour une intervention structurelle adaptée.

L'application d'essais mécaniques destructifs sur des matériaux historiques est une tâche doublement difficile :

1. Le nombre insuffisant d'échantillons autorisés au prélèvement,
2. La soumission à d'anciens procédés de fabrication autres que ceux exigés par les normes en vigueur.

L'extraction de petits cubes d'égales dimensions (40 mm de côté) est une technique envisageable pour résoudre le problème lié à l'insuffisance des échantillons. En effet, cela permet leur superposition par groupes de trois et l'extraction des informations à partir du cube central dont les déformations sont les plus représentatives. L'utilisation de l'extensomètre de type A (DD1) est idéale pour ce type de test lorsque l'épaisseur du cube le permet.

L'application du Système Optique par caméra vidéo est une technique très intéressante tant par sa méthode d'application que par la variété des résultats qu'elle peut fournir (module d'élasticité, coefficient de Poisson, trajectoire des déformations ponctuelles...). C'est aussi une solution très envisageable lorsqu'il s'agit de matériaux dont les caractéristiques géométriques et dimensionnelles ne permettent pas l'application d'extensomètres amovibles de type A (DD1). La comparaison entre les résultats obtenus par l'OS et ceux obtenus par les extensomètres de type B (LVDT), indique clairement une différence par rapport au module de Young calculé. Ce résultat justifie l'obligation d'extraire la courbe contrainte / déformation du cube central.

Les briques de la Casbah d'Alger ont une très bonne résistance à la compression avec un module de Young et une résistance à la compression dépassant la moyenne suggérée dans la littérature.

Au-delà de l'aspect visuel, les trois états de conservation des rondins de *Thuja* prélevés révèlent une bonne caractéristique mécanique avec une supériorité de 3% pour le spécimen intact par rapport à la moyenne suggérée dans la littérature. Ceci est extrêmement utile lors des procédures de réemploi des matériaux authentiques lors des projets de restauration des maisons de la Casbah d'Alger.

Les résultats obtenus concernant les deux matériaux les plus importants de la Casbah d'Alger, à savoir les briques en terre cuite et le bois de Thuya, peuvent en partie justifier la persistance de ce patrimoine universel.

4.2 Tests mécaniques semi-destructifs

4.3.1 Méthodologie

4.3.1.1 Méthodes

La deuxième partie des essais mécaniques est consacrée aux essais semi-destructifs. Deux méthodes distinctes sont mises en œuvre sur le fragment de mur en maçonnerie et le bois de *Thuja*.

La première méthode consiste à estimer la résistance du mortier de chaux dans les joints de maçonnerie par le moyen de l'application du pénétromètre. Nous avons utilisé un pénétromètre de type N conçu pour mortiers de faible résistance. Il convient de noter qu'il est considérablement difficile voire impossible de prélever des échantillons de mortier $40 * 40 * 80 \text{ mm}^3$ conformément aux exigences de norme (EN 1015-11, 2019). Par conséquent, de nombreuses méthodes semi-destructives ont été développées pour évaluer la résistance du mortier dans les joints de maçonnerie existants.

La deuxième méthode consiste à évaluer la densité et l'homogénéité fibreuse du bois de *Thuja*. De plus, le dispositif est utilisé pour identifier les zones d'intégrité structurelle inférieure aux normes telles que les dégradations, les fissures etc. Les variations de résistance à la torsion sont enregistrées par un stylet sur du papier millimétré. Nous avons utilisé un Resistographe de type IML-RESIF400-S.

4.3.1.2 Applications

4.3.1.2.1 Application du pénétromètre

Afin d'estimer la qualité du mortier utilisé lors de la construction des maisons de la Casbah d'Alger, nous avons extrait un fragment de mur in-situ (Tab 2.4.1). Nous avons appliqué 4 tests sur différents points (Fig 4.3.1).

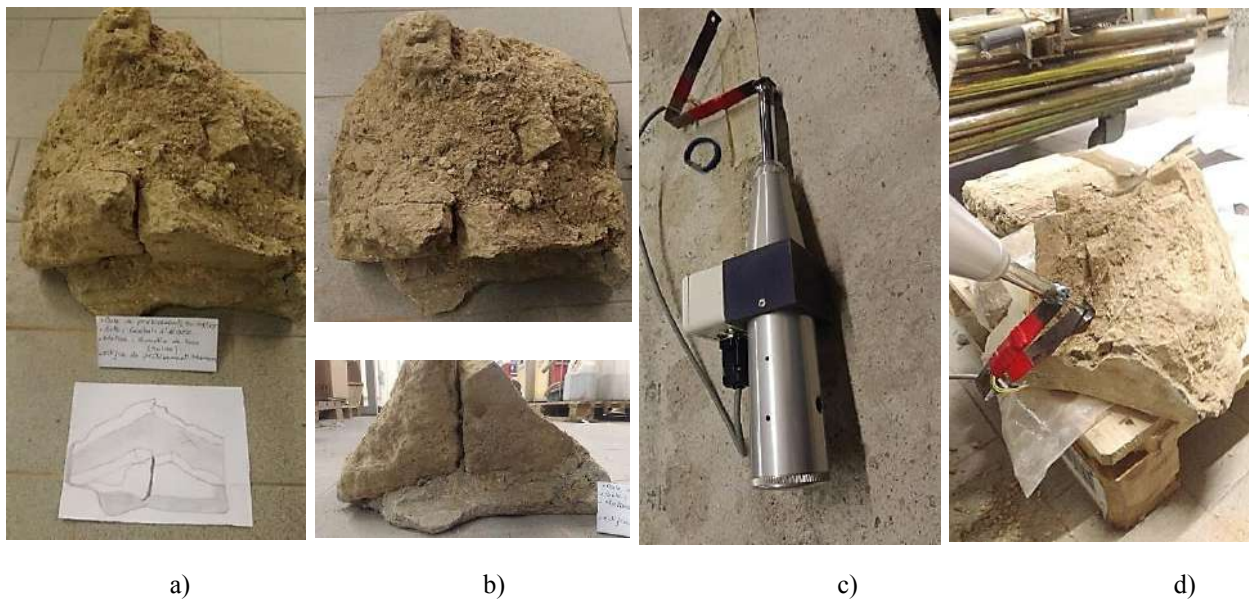


Fig 4.3.1 a) et b) Fragment de mur prélevé in-situ, c) Pénétromètre, d) application du Pénétromètre (Source : auteur)

La distance entre les points est d'environ 10 cm. L'application du pénétromètre (Type N) doit être perpendiculaire à la surface du mortier sous la même énergie d'essai qui est égale à 2207 J.

4.3.1.2.2 Application du résistographe

L'application du Résistographe est réalisée en deux tests perpendiculairement sur la surface de chaque échantillon comme indiqué dans la **Fig 4.3.2**.



Fig 4.3.2 Application du Résistographe (Source : auteur)

4.3.1.3 Résultats

4.3.1.3.1 Application du Pénétromètre

Nous avons obtenu pour chaque point d'application (pénétration) entre 9 et 17 coups (**Tab 4.3.1**). Nous appliquons le pénétromètre jusqu'à la pénétration totale de la tête de sonde (probe head), lorsqu'elle rencontre un obstacle, la lecture s'arrête et nous passons au point suivant. Cela justifie la variation du nombre de coups entre un point et un autre. Le pénétromètre contient une tête de sonde à son extrémité qui pénètre le mortier dont la distance est affichée sur l'appareil. Afin d'obtenir les valeurs de pénétration au niveau de chaque point, nous ajoutons pour chaque coup la valeur du précédent comme expliqué dans le tableau ci-dessous.

Point	N° coups	Résultats affichés	Pénétration (mm)	Point	N° coups	Résultats affichés	Pénétration (mm)
1	0	0	0	2	0	0	0
	1	2.4	2.4		1	3.55	3.55
	2	1.35	3.75		2	3.35	6.9
	3	1.4	5.1		3	3.5	10.4
	4	1.5	6.6		4	3.25	13.65
	5	1.3	7.9		5	2.55	16.15
	6	1.35	9.25		6	3.45	19.65
	7	1.55	10.8		7	2.7	22.3
	8	1.85	12.65		8	2	24.35
	9	2	14.65		9	4.25	28.55
	10	1.9	16.5	3	0	0	0
	11	2.05	18.55		1	8.9	4.45
	12	1.65	20.2		2	6.4	7.65
3	13	1.4	21.65		3	4	9.7
	0	0	0		4	1.2	10.25
	1	2.5	2.5		5	2.7	11.6
	2	2.45	4.95		6	2.7	12.95
	3	2.5	7.4		7	2.9	14.4
	4	2.4	9.8		8	3	15.95
	5	2.6	12.4		9	2.9	17.4
	6	2.2	14.6		10	4.3	19.55
	7	1.6	16.2		11	4.4	21.75
	8	2.05	18.25		12	3.7	23.6
	9	2.45	20.7		13	4	25.6
	10	1.1	21.8		14	4	27.4
	11	1.15	22.95		15	3.5	29.15
	12	1.45	24.5	4	0	0	0
	13	1.75	26.1		1	8.9	4.45
	14	1.15	27.25		2	6.4	7.65
	15	1.35	28.6		3	4	9.7
	16	1.4	30		4	1.2	10.25
	17	1.15	31.15		5	2.7	11.6

Tab 4.3.1 Résultats de l'application du Pénétrömètre (Source : auteur)

La Fig 4.3.3 montre la comparaison entre les quatre points d'application.

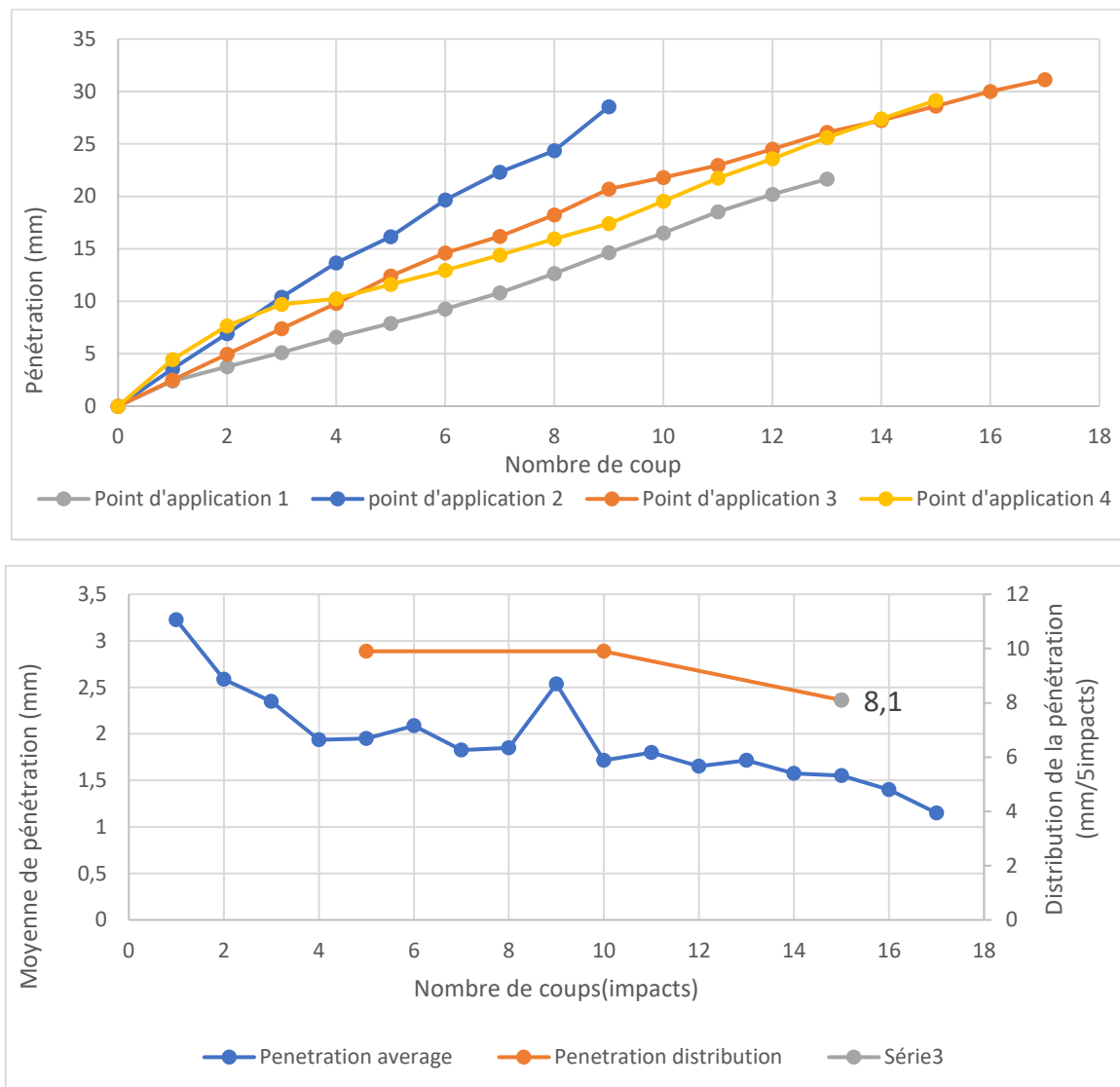


Fig 4.3.3 Résultats de l'application du Pénétromètre (Source : auteur)

Se basant sur les travaux de D.Latka et P. Matysek (Latka, et al., 2018), (Latka, et al., 2020) sur les différentes utilisations des techniques non destructives pour évaluer la résistance de la maçonnerie et du mortier, la résistance à la compression du mortier de chaux est estimée à 2 MPa. En effet, en se référant à la Fig 4.3.4, la profondeur de pénétration après 10 impacts est égale à 8,1 mm (la somme des pénétrations entre le 11^{ème} et 15^{ème} impact). Cette valeur est projetée sur la courbe proposée par (DRC, 2015) représentant la corrélation entre la profondeur de pénétration après 10 impacts et la résistance du mortier. Plus la profondeur de pénétration de l'aiguille en acier est élevée après 10 impacts successifs, plus la résistance du mortier est faible.

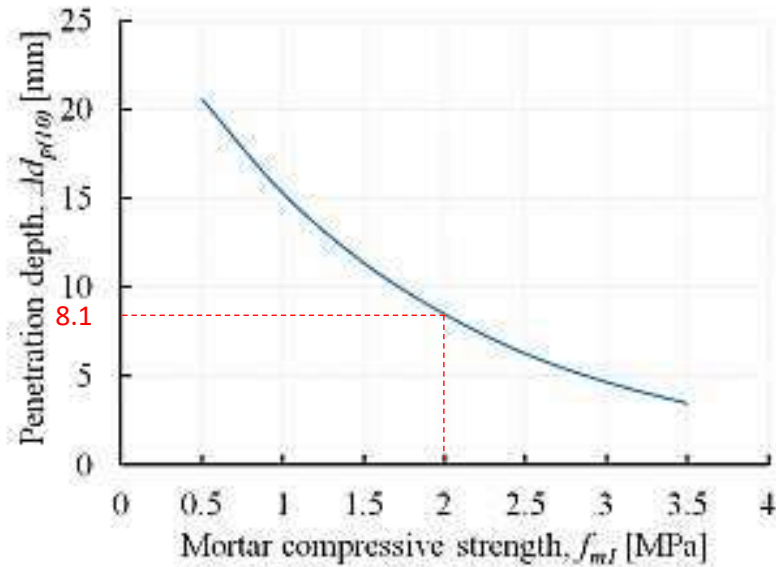


Fig 4.3.4 Courbe de corrélation entre la profondeur de pénétration et la résistance de compression du mortier
(Source: (DRC, 2015))

Ce résultat n'est pas tout à fait représentatif de la résistance du mortier de chaux de jointoiment, car le fragment de mur tel qu'expliqué dans la [Section 2.4](#) appartenait à une maison effondrée dans un site adjacent à l'agrégat. En effet, l'échantillon pourrait être endommagé en raison de l'effondrement, des conditions météorologiques ainsi que de son exportation vers le laboratoire technique en Italie, ce qui peut affecter ses propriétés mécaniques. Cependant, cette expérience est très utile car elle nous permet d'avoir une idée et une gamme sur la qualité du mortier de chaux de jointoiment utilisé dans la construction des maisons de la Casbah d'Alger.

4.3.1.3.2 Application du résistographe

Nous présentons dans la [Fig 4.3.5](#) les résultats d'application du résistographe correspondant à chaque échantillon. La profondeur de forage ainsi que la vitesse d'avancement sont résumées dans le [Tab 4.3.2](#).

	<i>Thuja 1-1</i>	<i>Thuja 1-2</i>	<i>Thuja 2-1</i>	<i>Thuja 2.2</i>	<i>Thuja 3-1</i>	<i>Thuja 3-2</i>
Profondeur de forage (cm)	8	8.15	5.4	6.7	7.6	8.1
Vitesse (cm/mn)	31.2					

Tab 4.3.2 Résultats de l'application du résistographe (profondeur de forage et vitesse d'avancement) (Source : auteur)

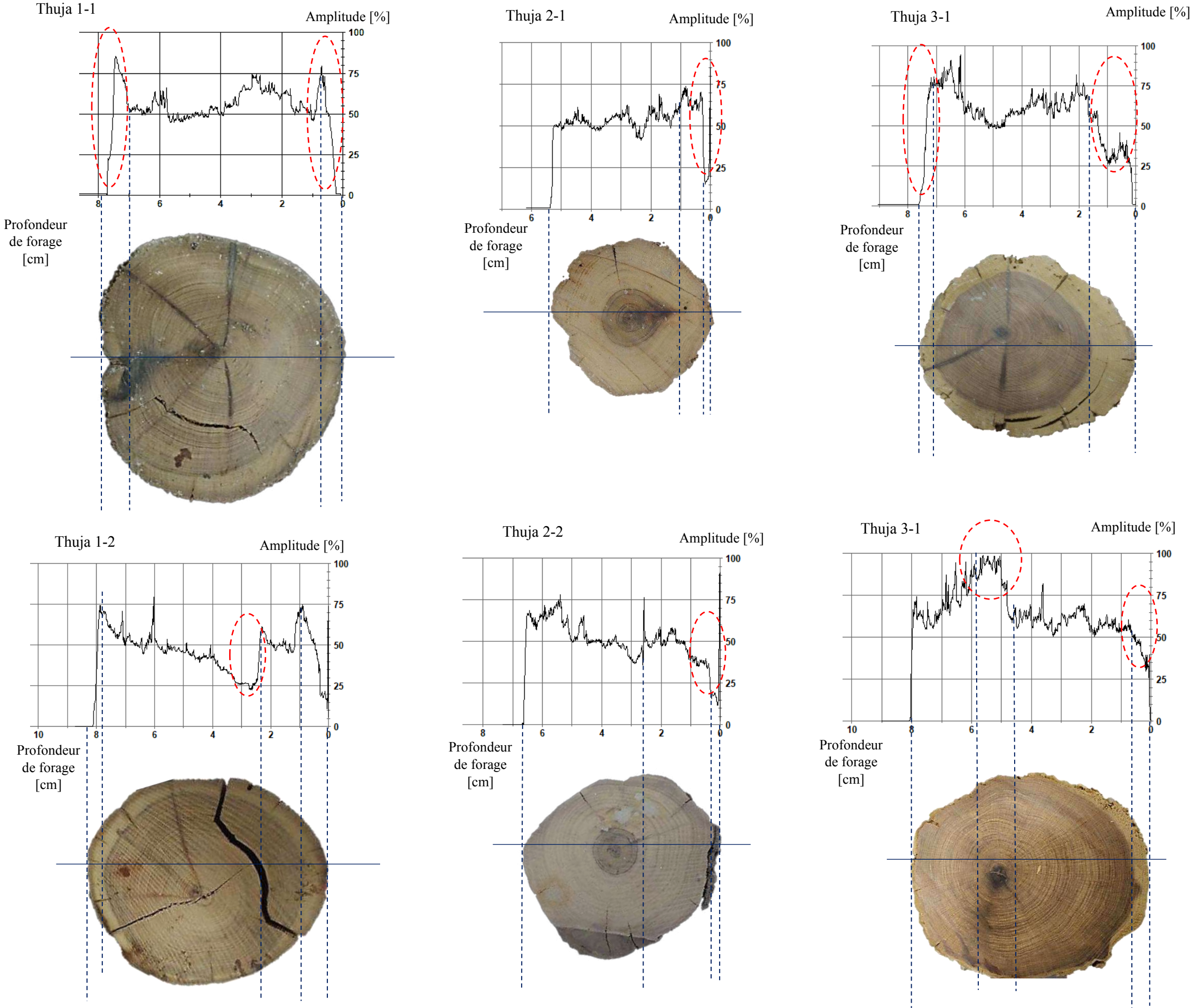


Fig 4.3.5 Résultats de l'application du Résistographe (Source : auteur)

4.3.2 Discussion

Application du Pénétromètre

Les résultats obtenus à partir de l'application du Pénétromètre indiquent un haut niveau d'homogénéité du mortier de jointoiement conformément aux recherches de (Latka, et al., 2018) et (Latka, et al., 2020).

Compte tenu d'une moyenne de 14 coups et d'une profondeur de pénétration moyenne égale à 2,14 mm / coup, la résistance à la compression du mortier de chaux est estimée à 2 MPa, ce qui, selon (NTC, 2019), est considéré comme un mortier de bonne qualité.

Application du résistographe

En analysant les résultats obtenus à partir de l'application du Résistographe, nous constatons que les trois échantillons de bois ont une résistance assez similaire malgré la différence dans leur état de conservation.

Ce résultat est extrêmement important car il nous renseigne sur l'état de conservation du bois sans se référer à l'aspect visuel dégradé qui souvent, représente un mauvais indicateur de classement. Cela permettra la récupération de plusieurs pièces en bois authentiques de la période ottomane et de les réintégrer dans les projets de restauration dans la Casbah d'Alger.

Afin de confirmer davantage ce résultat, nous avons réalisé des sections verticales sur les trois échantillons de bois. Les résultats présentés dans la figure (Fig 4.3.5) indiquent clairement la netteté du bois tout en affirmant que les pathologies et anomalies détectées visuellement ne sont que superficielles et n'atteignent en aucun cas ses propriétés mécaniques.

4.3.3 Conclusion

La réalisation d'essais semi-destructifs est un moyen très utile pour la caractérisation des matériaux de construction historiques. Ils permettent de diagnostiquer l'état de conservation des structures et des matériaux de construction sans recourir à des tests destructifs et au prélèvement d'échantillons périssables.

L'utilisation du pénétromètre a permis l'estimation de la résistance à la compression du mortier de chaux de jointoiement des maisons de la Casbah d'Alger grâce à son application sur le fragment de mur, qui est égale à 2MPa. Grâce à la courbe de corrélation entre la profondeur de pénétration et la résistance à la compression, le pénétromètre est une solution très envisageable lorsque l'extraction d'échantillons de mortier parallélépipédique est impossible, comme dans le cas des bâtiments historiques.

Une application in situ directe du pénétromètre est fortement recommandée pour une meilleure précision et exactitude. Cependant, son application sur le fragment de mur prélevé révèle une bonne qualité du mortier.

Le bois de *Thuja* est un matériau emblématique et omniprésent dans la Casbah d'Alger, de par son utilisation comme structure porteuse des planchers, des porte-à-faux et comme éléments de chaînage.

L'application du Résistographe sur trois états de conservation différents du bois de *Thuja* a indiqué une quasi-homogénéité de la résistance et de la densité, ce qui représente un résultat utile et important. En effet, les rondins de bois peuvent être réutilisés comme matériaux de réemploi authentiques dans les projets de restauration et de réhabilitation des maisons.

La classification du bois de *Thuja* en fonction de son état de conservation ne devrait pas se référer uniquement à l'aspect visuel mais doit être accompagnée d'une vérification par le biais d'essais semi ou non destructifs.

4.4 Tests mécaniques non-destructifs

4.4.1 Méthodologie

4.4.1.1 Méthodes

La troisième partie des tests mécaniques est consacrée aux essais non destructifs. Deux méthodes distinctes sont appliquées sur les briques en terre cuite et le bois de *Thuja*.

La première méthode consiste à estimer le degré d'humidité des trois échantillons de bois de *Thuja* à l'aide d'un capteur d'humidité *Tramex MEP*.

La deuxième méthode consiste à identifier la densité, la qualité et l'homogénéité de la composition des matériaux de construction par l'émission d'ondes ultrasonores à l'aide de l'Analyseur d'Impulsions à Ultrasons.

4.4.1.2 Application

4.4.1.2.1 Capteur d'humidité

Le capteur d'humidité est appliqué à trois états de conservation différents du bois de *Thuja* (**Fig 4.4.1**), à savoir :

1. Un échantillon de bois intact (**IW**),
2. Un échantillon de bois semi-endommagé (**SDW**),
3. Un échantillon de bois endommagé (**DW**).

Le détecteur d'humidité permet une émission profonde du signal jusqu'à plus de 25 mm dans les matériaux testés sans aucun endommagement de la surface. L'émission du signal dépend du matériau testé (bois, toiture, cloisons, plâtre, peintures, etc.) et du réglage du compteur.



Fig 4.4.1 Application du capteur d'humidité (*Capacitivo*) (Source : auteur)

4.4.1.2.2 Tests ultrasoniques

Le test par ultrasons est réalisé à l'aide d'un dispositif spécifique composé d'un boîtier de commande avec un écran d'affichage ainsi que de deux transducteurs (un émetteur et un récepteur) reliés par deux câbles (**Fig 4.4.2**).

Il permet la mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans le matériau, fournissant ainsi des informations sur la présence de fissures, vides et contraintes.



Fig 4.4.2 Composition de l'appareil à ultrasons (Source : auteur)

Tout d'abord, nous appliquons le test ultrasonore sur des cubes intacts appartenant aux deux briques 6 et 7 qui n'ont pas servi au test de compression. Le test par ultrasons n'a pas pu être appliqué à toutes les briques avant les tests de compression en raison de l'indisponibilité des appareils.

D'autre part, l'application d'un test par ultrasons sur des échantillons de bois de *Thuja* est effectuée avant l'application du test de compression.

Les échantillons écrasés ne peuvent pas être testés car les fissures générées pendant le test influencent considérablement les résultats de densité.

4.4.1.3 Résultats

4.4.1.3.1 Capteur d'humidité

Les résultats obtenus à partir de l'application du capteur d'humidité sont présentés dans le **Tab 4.4.1**.

	Illustration	Taux d'humidité (%)
Thuja 1 (IW)		24
Thuja 2 (SDW)		18



Tab 4.4.1 Résultats de l'application du capteur d'humidité (Source : auteur)

4.4.1.3.2 Tests ultrasoniques

4.4.1.3.2.1 Application sur les briques en terre cuite

Nous présentons dans le **Tab 4.4.2** la vitesse de propagation des ondes ultrasonores entre les faces opposées de chaque cube. Les résultats sont présentés en (μs), et ils sont convertis en ($\text{mm} / \mu\text{s}$) en fonction des dimensions des cubes.

Référence cube	Temps Propagation (μs)	Vitesse Propagation ($\text{mm}/\mu\text{s}$)	Moyenne ($\text{mm}/\mu\text{s}$)
I D	19.5	1.77	1.5
I E	29.0	1.26	
II D	13.5	2.15	2.4
II E	14.1	2.45	
II F	13.2	2.63	
II G	13.8	2.53	

Tab 4.4.2 Résultats de l'application du test ultrasonique sur les briques en terre cuite (Source : auteur)

4.4.1.3.2.2 Application sur le bois de *Thuja*

Nous présentons dans le **Tab 4.4.3** la vitesse de propagation des ondes ultrasonores entre les deux extrémités de chaque échantillon de bois de *Thuja* (**Fig 4.4.3**).

Fig 4.4.3 Application du test ultrasonique sur le bois de *Thuja* (Source : auteur)

Les résultats sont présentés en (μs), et ils sont convertis en ($\text{mm} / \mu\text{s}$) en fonction des dimensions des échantillons mentionnées dans le [Tab 4.2.2](#).

Code d'échantillon	Temps Propagation (μs)	Vitesse Propagation ($\text{mm}/\mu\text{s}$)	Moyenne ($\text{mm}/\mu\text{s}$)
IW	91	4.4	4.1
SDW	100	4.0	
DW	99	4.0	

Tab 4.4.3 Résultats du test ultrasonique sur le bois de *Thuja* (Source : auteur)

4.4.2 Discussion

L'application des tests ultrasoniques sur les petits cubes appartenant aux briques 6 et 7 indique ce qui suit :

1. La vitesse moyenne de propagation correspondant à la 7^{ème} brique ($2,4 \text{ mm} / \mu\text{s}$) est supérieure à la 6^{ème} ($1.5 \text{ mm} / \mu\text{s}$) indiquant une meilleure densité et un degré de porosité moindre.
2. Sur la base du test ultrasonique, des résultats du Système Optique par vidéo caméra, ainsi que de l'analyse visuelle de la 7^{ème} brique (aspect extérieur, couleur, forme...) ([Tab 4.2.1](#)), il est clair que sa composition physico-chimique est différente des autres briques. Cependant, on peut supposer qu'il s'agit d'une brique réutilisée ou qu'elle appartient à une autre époque dont les procédés de fabrication sont différents.

L'application du capteur d'humidité sur les trois échantillons de bois indique clairement une relation directe entre l'humidité et l'état de conservation du bois. En effet, les résultats obtenus varient de 8% pour l'échantillon de bois endommagé (DW) à 24% pour l'échantillon de bois intact (IW) tandis que l'échantillon semi-endommagé (SDW) prend une position intermédiaire avec une valeur de 18%.

En revanche, les résultats de l'application des tests ultrasonores indiquent une vitesse de propagation homogène pour les trois échantillons de bois de *Thuja*. En effet, on note $4,4 \text{ mm} / \mu\text{s}$ pour le bois intact (IW) et $4 \text{ mm} / \mu\text{s}$ pour les échantillons semi-endommagés et endommagés. Ce résultat est conforme aux résultats de l'application du Résistographe ([Section 4.3.1.3.2](#)). De plus, la vitesse de propagation élevée des ondes ultrasonores dans le bois de *Thuja* indique un degré de densité très élevé qui est proche de celui du béton à titre d'exemple.

Il est également important de noter que la différence d'humidité présente dans les échantillons de *Thuja* n'a pas affecté leurs performances mécaniques.

4.4.3 Conclusion

Les essais non destructifs sont un atout majeur dans le diagnostic des structures et des matériaux historiques pour diverses raisons : (1) rapidité d'exécution et d'extraction des résultats, et (2) non-endommagement des matériaux.

Les résultats obtenus à partir de l'application du capteur d'humidité ainsi que les tests ultrasoniques sur les échantillons de bois ont permis de confirmer davantage les observations faites lors de l'application des tests destructifs et semi-destructifs. En effet, une bonne homogénéité des propriétés mécaniques est constatée entre les différents états de conservation du bois.

Les tests par ultrasons appliqués aux petits cubes de briques en terre cuite appartenant aux échantillons 6 et 7 ont également permis de mettre en évidence la différence de composition physico-chimique des briques. En effet, ces derniers peuvent provenir de matériaux de réutilisation d'une époque antérieure (ancienne Casbah) ou ayant subi différents procédés de fabrication telles que l'utilisation d'une matière première différente ou d'un autre mode de cuisson.

4.5 Calcul d'incertitude

Nous présentons dans cette section le calcul du degré d'incertitude des différents résultats obtenus à partir des tests destructifs ainsi que du test semi-destructif à travers l'application du Pénétromètre.

La méthode Etape par Etape (*Step by Step Method*) est appliquée conformément aux travaux de (Quaglini, 2019), (Damasceno, et al., 2018) et (Hogan, 2015).

4.5.1 Module de Young : briques en terre cuite

La valeur de l'incertitude relative au module de Young des briques en terre cuite obtenue dans la [Section 4.2.1.4.1](#) est estimée en se basant sur la méthode étape par étape comme indiqué ci-dessous:

Étape 1: Identification de l'incertitude de l'input

Avant de calculer la valeur d'incertitude, nous devons identifier les sources d'incertitude qui peuvent affecter l'exactitude des résultats. Trois paramètres sont identifiés, à savoir :

1. L'incertitude de la jauge de longueur (UG)
Le premier paramètre est lié au pied à coulisse numérique pour mesurer les dimensions (surface) des petits cubes.
2. L'incertitude de la cellule de charge (UL)
Le deuxième paramètre est lié à la machine de compression.
3. Incertitude de l'extensomètre (UE)
Le troisième paramètre est lié à l'extensomètre qui nous permet de mesurer la déformation.

Étape 2: Évaluation de l'incertitude standard de chaque source

L'incertitude de l'input et la distribution de probabilité sont tirées du manuel technique de chaque instrument utilisé pendant le test, à savoir: Pied à coulisse numérique (**DIG**), Cellule de charge (**The**) et Extensomètre (**ELE**). Ils sont présentés dans le [Tab 4.5.1](#).

Source	Incertainitude de l'input	Probabilité de Distribution	Diviseur Di
UG	$2 \cdot 10^{-2}$ mm	normal(k=1)	1
UL	6.1 N	normal(k=2)	2
UE	$8 \cdot 10^{-5}$ mm/mm	normal(K=2)	2

Tab 4.5.1 Incertitude de l'input et distribution de probabilité (Source : auteur)

Étape 3: Calcul du coefficient de sensibilité

Nous déterminons le coefficient de sensibilité pour chaque source d'incertitude en appliquant les formules suivantes (**5**). Les résultats sont affichés dans le [Tab 4.5.2](#).

$$\partial f / \partial x_i \approx \Delta f / \Delta x_i = C_i$$

$$E = \sigma / \epsilon = F / (A^2 \cdot \epsilon) \quad (5)$$

Où :

E: module de Young (MPa) ; σ : contrainte (MPa) (N / mm²) ; ϵ : déformation (mm / mm)

A: longueur du cube (mm) ; L: longueur entre les bornes sensibles de l'extensomètre (mm)

CF: coefficient de sensibilité pour cellule de pesée ; CL: coefficient de sensibilité de l'épaisseur

CE: coefficient de sensibilité de l'extensomètre

Considérant les valeurs suivantes obtenues à partir du déplacement le plus élevé (Fig 4.2.17).

A=40mm L=25mm $\epsilon=0.0057$ mm/mm F=12530.3 N

$$C_F = \partial E / \partial F = 1 / (L^2 \epsilon) = 0.12$$

$$C_L = \partial E / \partial L = -F / (\epsilon \cdot A^2 \cdot L) = 54.96$$

$$C_\epsilon = \partial E / \partial \epsilon = -F / (L^2 \cdot \epsilon^2) = 241,041.47$$

Source	Incertitude de l'input ai	Probabilité de Distribution	Diviseur Di	Coefficient de sensibilité Ci
UG	2.10 ⁻² mm	Normal (k=1)	1	54.96
UL	6,1 N	Normal (k=2)	2	0.12
UE	8.10 ⁻⁵ mm/mm	Normal (k=2)	2	241,041.47

Tab 4.5.2 Calcul du coefficient de sensibilité (Source : auteur)

Etape 4 : Calcul des incertitudes standards

Afin de calculer l'incertitude standard pour chaque source, nous appliquons la formule suivante : Incertitude standard = (incertitude d'entrée / diviseur) x coefficient de sensibilité. Les résultats sont affichés dans le Tab 4.5.3.

Source	Incertitude de l'input	Probabilité de Distribution	Diviseur Di	Coefficient de sensibilité Ci	Incertitude Standard Ui
UG	2.10 ⁻² mm	Normal (k=1)	1	54.96	1.1
UL	6,1 N	Normal (k=2)	2	0.12	3.7*10 ⁻¹
UE	8.10 ⁻⁵ mm/mm	Normal (K=2)	2	241041.47	9.64

Tab 4.5.3 Calcul des incertitudes standard (Source : auteur)

Étape 5: Calcul de l'incertitude standard combinée

L'incertitude standard combinée est déterminée en appliquant la formule (6) suivante:

$$U_c^2(y) = \sum_1^N [c_i \cdot U(x_i)]^2 \quad (6)$$

$$U_c(y) = 9.7 \text{ MPa}$$

Étape 6: Calcul de l'Incrtitude Elargie par un Facteur de Couverture

$U_c(y) = 2 \times 9.7 = 19.4 \text{ MPa}$ à un niveau de confiance de 95,45%

$U_c(y) = 3 \times 9.6 = 29.1 \text{ MPa}$ à un niveau de confiance de 99,73%

Module de Young de la brique en terre cuite : $E = (4440 \pm 19.4) \text{ MPa}$

4.5.2 Résistance à la compression : briques en terre cuite

Nous appliquons les mêmes étapes présentées dans la [Section 4.5.1](#) afin de calculer le degré d'incertitude de la résistance à la compression des briques en terre cuite en considérant :

1. Deux sources d'incertitude, à savoir :
 - a. L'incertitude de la jauge de longueur (UG)
 - b. L'incertitude de la cellule de charge (UL)

2. Les formules suivantes (7):

$$\frac{\partial f}{\partial x_i} \approx \Delta f / \Delta x_i = C_i$$

$$\sigma = F / L^2 \quad (7)$$

Où :

σ : contrainte (MPa) ou (N / mm²) ; F: charge (N) ; A: longueur du cube (mm) ; L: longueur entre les bornes sensibles de l'extensomètre (mm).

3. Les valeurs suivantes correspondant à la charge la plus élevée obtenue à partir du [Tab 4.2.4](#):
 $A = 40 \text{ mm}$, $L = 25 \text{ mm}$, $F = 45000 \text{ N}$.

Les résultats sont affichés dans le [Tab 4.5.4](#).

Source	Incrtitude de l'input	Probabilité de Distribution	Diviseur Di	Coefficient de sensibilité Ci	Incrtitude Standard Ui	Incrtitude Standard combinée Uc
UG	2.10^{-2} mm	Normal (k=1)	1	1.12	$2.24 \cdot 10^{-2}$	0.02
UL	6,1 N	Normal (k=2)	2	$6.25 \cdot 10^{-4}$	$1.91 \cdot 10^{-3}$	

Tab 4.5.4 Calcul des incertitudes standard (Source : auteur)

L'incertitude élargie calculée par un facteur de couverture est :

$U_c(y) = 2 \times 0,02 = 0,04$ MPa à un niveau de confiance de 95,45%

$U_c(y) = 3 \times 0,02 = 0,06$ MPa à un niveau de confiance de 99,73%

Résistance à la compression de la brique en terre cuite : $\sigma = (17,80 \pm 0,04)$ MPa

4.5.3 Module de Young : bois de *Thuja*

La valeur de l'incertitude relative au module de Young du bois de *Thuja* obtenue est calculée en se basant sur la méthode Etape par Etape présentée dans la [Section 4.5.1](#) en considérant :

1. Trois sources d'incertitude, à savoir :
 - a. L'incertitude de la jauge de longueur (UG) : le premier paramètre est lié au pied à coulisse numérique pour mesurer les diamètres (surface).
 - b. L'incertitude de la cellule de charge (UL) : le deuxième paramètre est lié à la machine de compression.
 - c. Incertitude de l'extensomètre (UE) : le troisième paramètre est lié à l'extensomètre qui permet de mesurer la déformation.

2. La formule suivante (8):

$$\frac{\partial f}{\partial x_i} \approx \Delta f / \Delta x_i = C_i$$

$$E = \sigma / \epsilon = F / (\pi \cdot r^2 \cdot \epsilon) \quad (8)$$

Où:

E: module de Young (MPa) ; σ : contrainte (MPa) (N / mm²) ; ϵ : déformation (mm / mm)

r: rayon moyen des spécimens de *Thuja* (mm); L: longueur entre les bornes sensibles de l'extensomètre (mm)

C_F : coefficient de sensibilité pour cellule de pesée ; C_L : coefficient de sensibilité du pied à coulisse numérique, C_ϵ : coefficient de sensibilité de l'extensomètre.

3. Les valeurs suivantes correspondant à la charge la plus élevée obtenue à partir de la ([Fig 4.2.27](#)) : $r = 37$ mm, $\epsilon = 0,011$ mm / mm , $L = 200$ mm, $F = 98068,1$ N.

Les résultats sont affichés dans le [Tab 4.5.5](#).

Source	Incertitude de l'input	Probabilité de Distribution	Diviseur Di	Coefficient de sensibilité C_i	Incertitude Standard U_i	Incertitude Standard combinée U_c
UG	$2 \cdot 10^{-2}$ mm	Normal (k=1)	1	10.37	0.21	7.55
UL	6.1 N	Normal (k=2)	2	0.02	0.061	
UE	$8 \cdot 10^{-5}$ mm/mm	Normal (k=2)	2	188542.51	7.54	

Tab 4.5.5 Calcul des incertitudes standard (Source : auteur)

L'incertitude élargie calculée par un facteur de couverture est :

$U_c(y) = 2 \times 7,55 = 15,11$ MPa à un niveau de confiance de 95,45%

$U_c(y) = 3 \times 7,55 = 22,67$ MPa à un niveau de confiance de 99,73%

Module de Young du bois de *Thuja* : $E = (6840 \pm 15,11)$ MPa

4.5.4 Résistance à la compression : bois de *Thuja*

En appliquant la même méthode présentée dans (Section 4.5.1), la valeur d'incertitude de la résistance à la compression du bois de *Thuja* est calculée en tenant compte de :

- 1- Deux sources d'incertitude, à savoir :
 - a. L'incertitude de la jauge de longueur (UG)
 - b. L'incertitude de la cellule de pesée (UL)

- 2- Des formules suivantes (9):

$$\frac{\partial f}{\partial x_i} \approx \Delta f / \Delta x_i = C_i$$

$$\sigma = F / \pi r^2 \quad (9)$$

Où :

σ : contrainte (N / mm²) ; F: charge (N) ; r: rayon (mm)
L: longueur entre les bornes sensibles de l'extensomètre (mm)

- 3- Des valeurs suivantes correspondant à la charge la plus élevée obtenue à partir du **Tab 4.2.10**:
 $r = 37\text{mm}$, $L = 200\text{mm}$, $F = 98068.1$ N

Les résultats sont affichés dans le **Tab 4.5.6**.

Source	Incrtitude de l'input	Probabilité de Distribution	Diviseur Di	Coefficient de sensibilité Ci	Incrtitude Standard Ui	Incrtitude Standard combinée Uc
UG	2.10^{-2} mm	Normal (k=1)	1	0.11	$2.2 \cdot 10^{-3}$	0.002
UL	6,1 N	Normal (k=2)	2	$2.32 \cdot 10^{-4}$	$7.08 \cdot 10^{-4}$	

Tab 4.5.6 Calcul des incertitudes standard (Source : auteur)

L'incertitude élargie calculée par un facteur de couverture est :

$U_c(y) = 2 \times 0,002 = 0,004$ MPa à un niveau de confiance de 95,45%

$U_c(y) = 3 \times 0,002 = 0,006$ MPa à un niveau de confiance de 99,73%

Résistance à la compression de la brique en terre cuite : $\sigma = (37.6 \pm 0,004)$ MPa

4.5.5 Test au pénétromètre

En appliquant la même méthode présentée dans (Section 5.1), la valeur d'incertitude de l'application du pénétromètre sur le fragment de mur est estimée en considérant une seule source d'incertitude, à savoir : le pénétromètre (UP) (Tab 4.5.7).

Source	Incertitude de l'input	Probabilité de Distribution	Diviseur Di	Coefficient de sensibilité Ci	Incertitude Standard Ui	Incertitude Standard combinée Uc
UP	0.3 mm	Normal (k=1)	1	1	0.3	0.3

Tab 4.5.7 Calcul des incertitudes standard (Source : auteur)

$U_c(y) = 2 \times 0,3 = 0,6$ mm à un niveau de confiance de 95,45%

$U_c(y) = 3 \times 0,3 = 0,9$ mm à un niveau de confiance de 99,73%

La profondeur de pénétration moyenne : $(2,15 \pm 0,60)$ mm / coup

4.6 Conclusion

La caractérisation des matériaux de construction est un élément clé de chaque intervention visant la préservation du patrimoine architectural bâti. Cette étape permet tout d'abord de renseigner et de documenter les caractéristiques mécaniques des matériaux de construction historiques, et de constituer par la suite une référence importante lors du calibrage des modèles numériques dans les analyses structurelles présentées dans le chapitre 5.

Dans ce chapitre, la principale difficulté rencontrée était de découvrir comment extraire les caractéristiques mécaniques des matériaux de construction historiques qui ne répondent pas aux normes de fabrication actuelles et dont le nombre d'échantillons est limité. Grâce aux techniques et procédures développées au laboratoire, des données intéressantes ont pu être extraites démontrant des valeurs supérieures à celles proposées et disponibles dans la littérature.

La caractérisation du bois de *Thuja* dans ses trois états de conservation a également fourni des informations importantes quant à sa possibilité de réutilisation lors des projets de restauration des maisons de la Casbah d'Alger.

Nous présentons dans le chapitre 5 les résultats des analyses structurelles par Éléments Finis de l'agrégat.

Chapitre 5

Analyse structurelle

5.0 Introduction

La simulation numérique du comportement structurel des bâtiments existants à l'état statique ou sismique est l'un des processus les plus complexes et avancés disponibles actuellement. En effet, il permet non seulement d'évaluer les performances structurelles d'un bâtiment existant vis-à-vis des différentes sollicitations auxquelles il est soumis, mais également de détecter les parties structurelles les plus défaillantes. Cette méthode permet donc de réduire considérablement l'apparition d'anomalies et de dommages structurels grâce à des interventions adaptées avant même leur apparition, comme dans le cas des bâtiments historiques. Néanmoins, il existe plusieurs méthodes, approches et échelles d'analyse qu'il est important de présenter brièvement au préalable.

Les simulations structurelles de bâtiments existants peuvent être réalisées à différentes échelles en fonction de l'objectif principal de chaque analyse. En effet, on distingue principalement quatre échelles classées par ordre croissant comme suit :

1. Échelle micro-locale : elle consiste à analyser les interactions de microstructures telles que les couches superficielles de briques et celles de mortier dans un mur en maçonnerie.
2. Échelle macro-locale : elle consiste à analyser le comportement d'un élément structurel au sein d'un édifice telle que la façade d'une mosquée.
3. Échelle micro-globale : elle consiste à étudier le comportement structurel de toute une partie d'un système structurel complexe tels que la nef centrale et le clocher d'une église ou le patio d'une maison introvertie.
4. Échelle macro-globale : il s'agit d'une analyse d'un système structurel complexe comme une mosquée ou un agrégat.

Le comportement mécanique des matériaux de construction a une influence majeure sur la réponse structurelle générale d'une structure, allant des matériaux fragiles tels que les pierres, le béton et la maçonnerie, aux matériaux ductiles tels que les métaux. La ductilité fait référence à la capacité d'un matériau à se déformer plastiquement et à subir une déformation irréversible sans se rompre. La défaillance survient lorsqu'une anomalie (fissure ou cavité) devient critique et se propage. Un matériau qui présente une forte déformation plastique à la rupture est dit ductile, sinon il est dit cassant. La principale différence entre les matériaux de construction au-delà de leur capacité de résistance est la proportion entre les deux phases à savoir : élastique (linéaire) et plastique (non linéaire). Cela dit, les analyses structurelles sont divisées en deux catégories en fonction des caractéristiques mécaniques introduites des matériaux de construction à savoir: les analyses structurelles linéaires et non linéaires (Naatje, 2017), ceci d'une part.

D'autre part, il est important de considérer également la nature des forces et contraintes appliquées lors d'une analyse structurale qui peut être statique ou dynamique. Les charges ou forces statiques sont des charges qui ne changent pas en intensité, en position ou en direction comme le poids d'un bâtiment agissant sur le sol sous l'effet de la gravitation. Les charges ou forces dynamiques sont des charges qui changent en intensité, en position ou en direction telles que charges sismiques ou celles générées par le vent. Cependant, les analyses structurelles peuvent également être divisées en deux catégories à savoir: statique et dynamique. Il existe plusieurs méthodes d'analyse pour chaque catégorie qui sont expliquées et détaillées dans plusieurs normes telles que (ATC 40, 1996), (RPA, 2003), (EN 1998-1, 2004), (NTC, 2019).

En général, la résolution d'un problème de mécanique solide doit satisfaire des équations d'équilibre (statique ou dynamique), des conditions de compatibilité entre les déformations et les déplacements, et des relations contrainte-déformation (loi de comportement des matériaux).

À partir de la prise en compte des équations d'équilibre, nous pouvons relier les contraintes à l'intérieur d'un corps aux excitations externes, y compris les forces corporelles et de surface. Il existe trois équations d'équilibre reliant les six composantes du tenseur de contraintes pour un élément matériel infinitésimal. Dans le cas de la dynamique, les équations d'équilibre sont remplacées par des équations de déplacement (Liu, et al., 2000).

De même, en tenant compte des conditions géométriques, on peut relier les déformations à l'intérieur d'un corps à ses déplacements, par six équations cinématiques exprimant les six composantes de déformation en fonction des trois composantes de déplacement. Celles-ci sont connues sous le nom de relations déformation-déplacement.

Les équations d'équilibre et la cinématique sont valables quel que soit le matériau spécifique dont est composé le corps. L'influence du matériau est exprimée par des lois de comportement en six équations. Dans le cas le plus simple, sans tenir compte des effets de la température, du temps, des taux et des trajectoires du chargement, les équations ne peuvent être décrites que par les relations contrainte / déformation.

Six composantes de contrainte, six composantes de déformation et trois composantes de déplacement sont reliées par trois équations d'équilibre, six équations cinématiques et six équations constitutives. Les 15 quantités inconnues peuvent être déterminées à partir d'un système de 15 équations.

En résolvant un problème en mécanique des solides, la méthode la plus directe résout les trois ensembles d'équations décrits précédemment. En règle générale, il existe trois façons d'établir les inconnues de base, à savoir les composants de déplacement, les composants de contrainte ou une combinaison des deux. Les procédures correspondantes sont appelées respectivement méthode de déplacement, méthode de contrainte ou méthode mixte. Mais ces méthodes directes ne sont pratiques que dans certaines circonstances simples, telles que celles détaillées dans la théorie élastique de la mécanique des solides.

De nombreux problèmes complexes ne peuvent pas être facilement résolus avec des procédures conventionnelles. Les complexités résultent des facteurs tels que la géométrie irrégulière, l'hétérogénéité des matériaux, la non-linéarité etc. Une alternative désormais disponible est basée sur un concept de discrétisation. Les formulations de la Méthode des éléments Finis FEM sur les lois et principes régissant le comportement des corps aboutissent généralement à un ensemble d'équations simultanées qui peuvent être résolues par des procédures directes ou itératives. La FEM a été jusqu'à présent la méthode d'analyse structurelle la plus utilisée. Nous présentons dans la **Fig 5.0** un résumé des différents composants d'une analyse structurelle mentionnés dans cette section.

Afin de répondre à la problématique mise en évidence en amont de cette thèse (**Section 1.1.2**) et de comprendre le comportement structurel de l'agrégat, nous présentons une analyse structurale numérique par éléments finis à l'échelle macro-globale. Une première analyse linéaire statique est présentée comme point de départ afin de comprendre la réponse structurelle de l'agrégat sous l'effet des charges statiques dans sa phase élastique.

Une seconde analyse sismique est présentée sous le nom d'Analyse Pushover PA ou Analyse statique non linéaire afin d'évaluer la réponse structurelle de l'agrégat aux contraintes horizontales générées par l'événement sismique. L'AP est présentée en trois phases distinctes à savoir :

1. Un résumé méthodologique et théorique de la méthode.
2. Une comparaison des formes de déformation entre l'analyse statique linéaire Pushover et l'analyse modale.
3. Une analyse Pushover statique non linéaire.

Enfin, nous présentons à la fin de cette cinquième partie de la thèse une comparaison entre le comportement structurel des maisons à l'état agrégé et désagrégé.

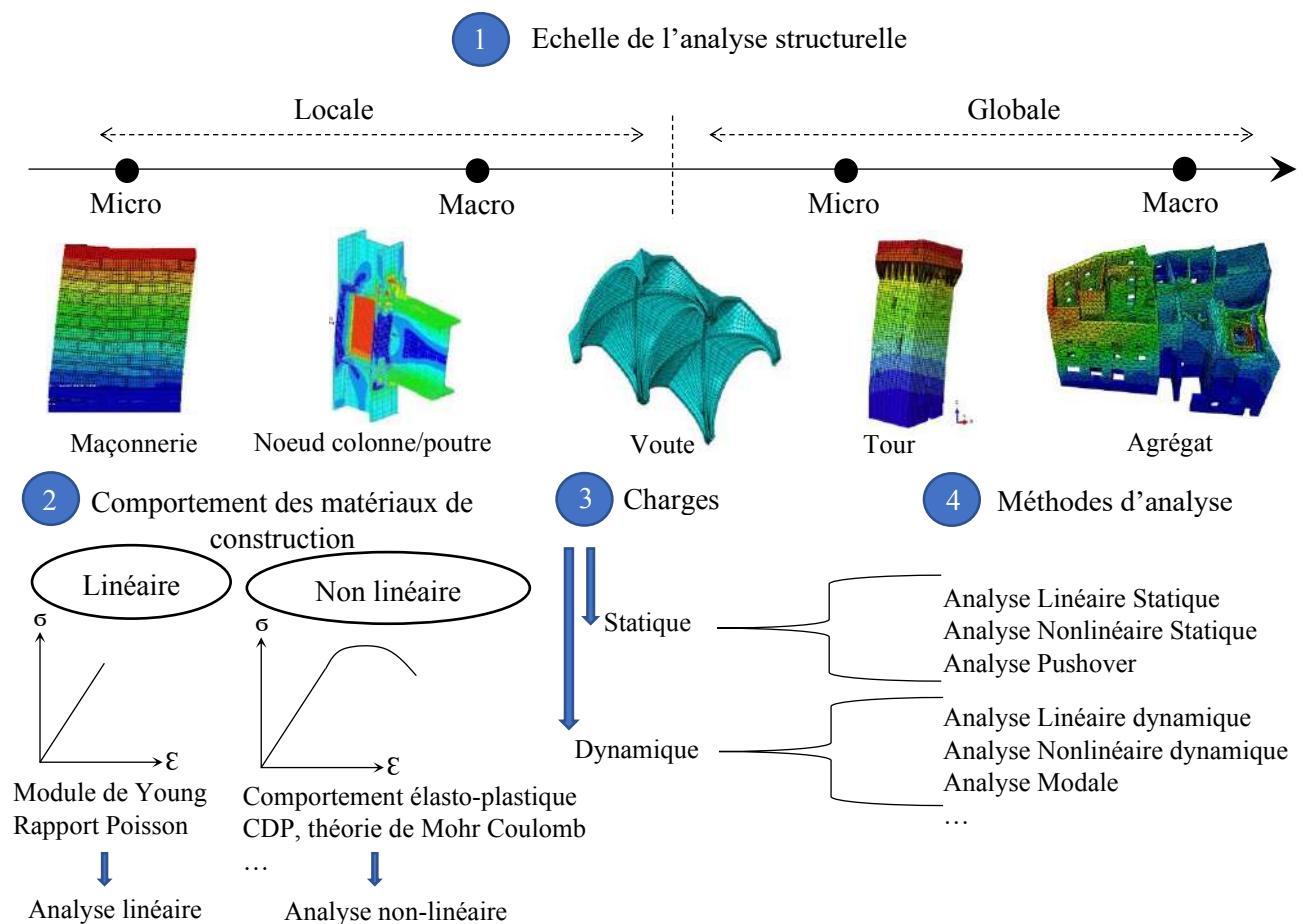


Fig 5.0 Résumé des principales composantes d'une analyse structurelle (Source : auteur).

5.1 Analyse Linéaire Statique (LSA)

5.1.1 Introduction

L'Analyse Statique Linéaire (LSA) est présentée dans ce chapitre comme la première étape de l'analyse structurale de l'agrégat à l'aide du logiciel d'Analyse par Eléments Finis (FEA) «Abaqus».

Cette analyse est réalisée en appliquant les charges permanentes, d'exploitation et géostatiques, afin de comprendre : 1) le comportement structurel général dans le domaine élastique statique et 2) de localiser les parties les plus vulnérables de la structure qui servent de référence lors de la sélection des points de control pour l'analyse PA. Un modèle géométrique de l'agrégat est présenté comme une première étape montrant les aspects structurels les plus importants de l'agrégat qui sont pris en compte dans la LSA.

Les différentes charges agissant sur l'agrégat à l'état statique sont calculées avec une démonstration de la résistance du plancher suivie d'une simulation structurale.

5.1.2 Présentation du modèle structurel

Le modèle structurel de l'agrégat contenant les cinq maisons est modélisé à partir du nuage de points en utilisant le logiciel basé sur le BIM «Revit» (**Fig 5.1.1**). Ce modèle comprend uniquement les éléments de structure à savoir : (1) les murs porteurs en maçonnerie, (2) les colonnes en tuf et (3) les solives (poutres) et éléments de chaînage en bois de *Thuja*.

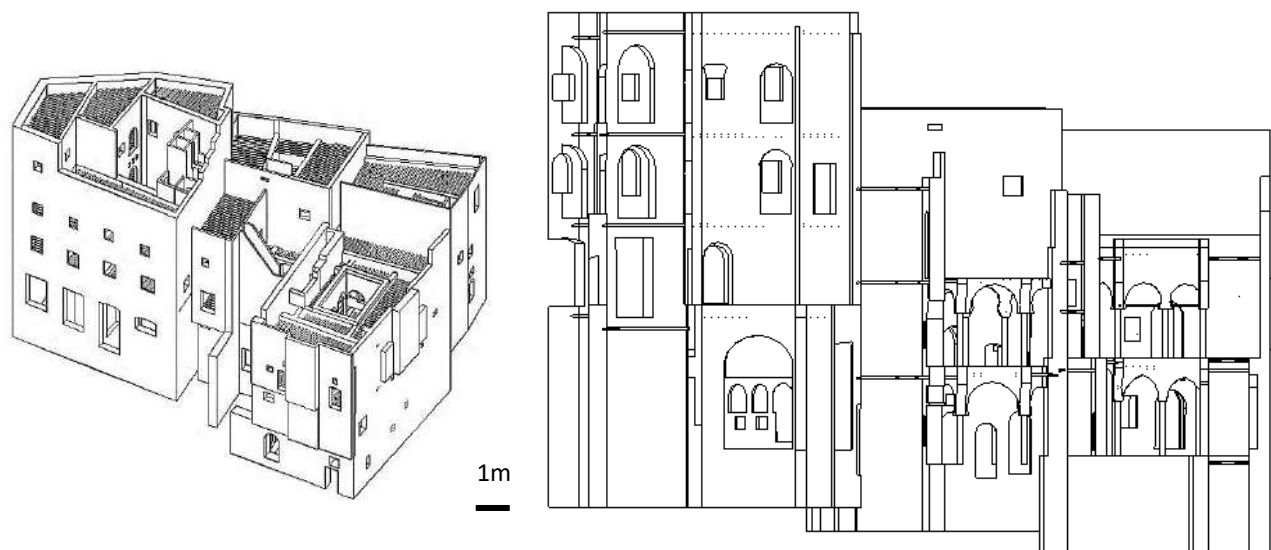


Fig 5.1.1 Modèle structurel (HBIM) obtenu grâce au logiciel Revit (Source : auteur).

À gauche) axonométrie de l'agrégat, à droite) section longitudinale

Toutes les parois originelles de l'agrégat sont porteuses, leur épaisseur varie de 15 cm à 90 cm. Cette variation dépend tout d'abord de la position des murs dans le bâtiment, les murs les plus épais sont :

1. Les murs périphériques qui représentent les façades extérieures des maisons.
2. Les murs intérieurs entourant le patio et soutenant les galeries.
3. Les murs attenants qui permettent de relier les maisons entre elles.

De plus, les murs du rez-de-chaussée sont beaucoup plus épais, et leurs épaisseurs diminuent progressivement dans les niveaux supérieurs laissant place à une configuration en gradins (Fig 5.1.2).

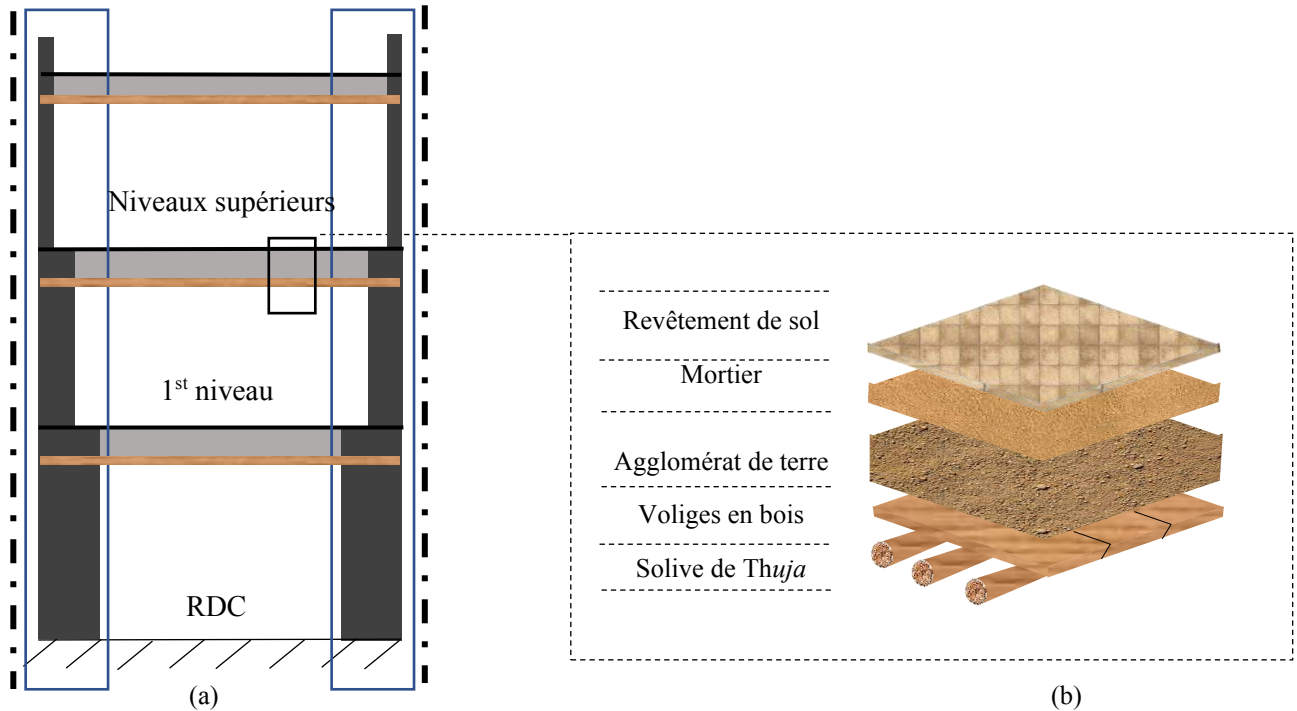


Fig 5.1.2 a) Configuration en gradins des murs porteurs, b) schématisation de la composition des planchers (Source : auteur).

Les arcades sont composées de plusieurs colonnes de tuf qui contribuent à l'écriture esthétique et architecturale du patio et transmettent les charges verticales de la galerie aux étages inférieurs. Le nombre d'arcades dépend évidemment de la taille de chaque patio. Dans notre étude de cas, les patios sont constitués de deux ou trois arcades.

Le bois de *Thuja* est un matériau omniprésent et typique des maisons de la Casbah d'Alger. En effet, nous citons trois utilisations principales de ce bois :

- 1- La composition du plancher : les solives de *Thuja* (poutres) représentent la partie porteuse des planchers qui permet la transmission des charges verticales (charges permanentes et d'exploitation) du plancher aux murs porteurs en maçonnerie. Le plancher dans sa section transversale est constitué de 5 strates (couches) (Fig 5.1.2), elles sont énumérées dans ce qui suit en partant de bas en haut :
 - a. Solives de *Thuja*
 - b. voliges en bois
 - c. Agglomérat (mélange de terre et pierre)
 - d. Mortier (mélange de chaux et d'argile)
 - e. Revêtement de sol (carreaux en terre cuite ou marbre)
- 2- Le chaînage : des éléments en bois sont présents à des endroits précis entre les arcs qui composent le patio et parfois entre les arcades et le mur porteur entourant le patio (Fig 5.1.3).

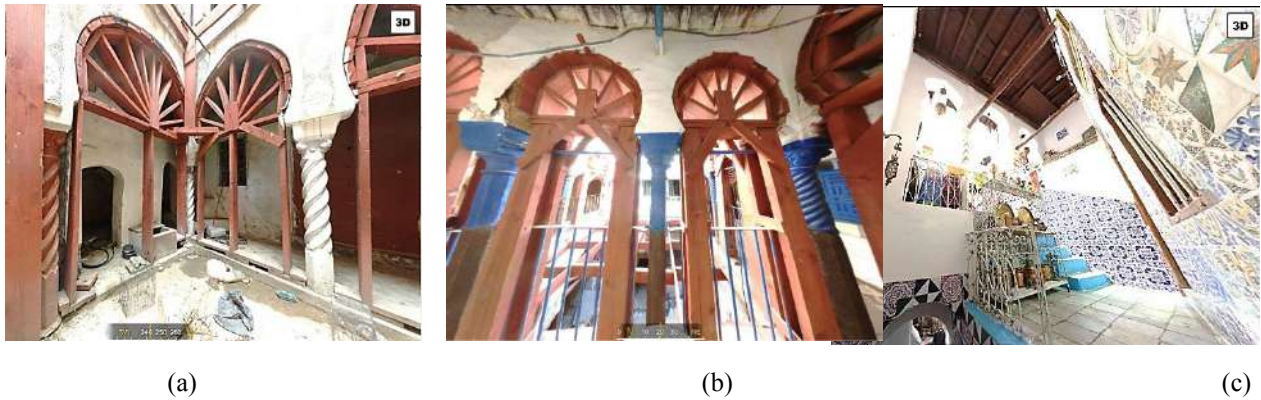


Fig 5.1.3 Aspects constructifs (Source : auteur)

a) colonne de tuf entourant le patio, b) chaînage en bois entre arcs, c) chaînage en bois entre arcade et mur porteur en maçonnerie.

- 3- Les encorbellements : éléments spécifiques et typiques qui caractérisent les façades des maisons. Ils permettent de supporter les porte-à-faux « *K'bou* » grâce au prolongement des solives de *Thuja* hors façade et dans la plupart des cas par l'insertion de rondins inclinés à $45^\circ / 30^\circ$ qui sont encastrés dans le mur de façade (Fig. 5.1.4).



Fig 5.1.4 Détails sur les encorbellements (*K'bou*) (Source : auteur)
a) façade principale de la 4^{ème} maison (agrégat), b) entrée d'une maison adjacente

5.1.3 Calcul des charges statiques

Trois types de charges sont appliquées à l'agrégat à l'état statique : (1) l'accélération gravitaire, (2) les charges permanentes et d'exploitation (3) les charges géostatiques. La LSA est réalisée sur le modèle structural à l'exclusion des solives de *Thuja* (poutres) qui composent les planchers. Les charges sont donc appliquées sur les murs porteurs afin de localiser plus précisément les déformations et anomalies structurales. Il convient de rappeler que les murs porteurs en maçonnerie sont considérés comme des éléments de contreventement qui réduisent considérablement la vulnérabilité sismique d'un bâtiment.

De plus, une démonstration de la résistance aux charges permanentes et d'exploitation à l'état limite ultime (ELU) des poutrelles *Thuja* est présentée ci-dessous. Le poids total des planchers est pris en compte dans le calcul des charges verticales. Sur la base des densités et des données affichées dans le **Tab. 5.1.1** et en considérant un espacement de 0,25 m entre deux solives successives, le poids total du plancher à l'état limite ultime (P_{ELU}) est calculé en appliquant la combinaison suivante : $P_{ELU} = 1,35 G + 1,5Q$, où (G) et (Q) représentent respectivement les charges permanentes et d'exploitation.

Strates du plancher	Densité	Diamètre / épaisseur	Charge permanente (gi)		(G)		(Q)	(P _{ULS})	
	KN/m ³	m	KN/m ²	KN/ml	KN/m ²	KN/ml	KN/m ²	KN/m ²	KN/ml
Revêtement	18.0	0.02	0.36	0.09	6.7	1.67	1.50	11.3	2.82
Mortier	15.0	0.03	0.45	0.11					
Agglomérat	20.0	0.28	5.6	1.40					
Voliges	4.9	0.02	0.098	0.02					
<i>Thuja</i>	6.8	0.10	0.2	0.05					

Tab 5.1.1 Le calcul du poids du plancher à l'état limite ultime (ULS) (Source : auteur)

En se basant sur la formule (5.1) et en considérant une longueur moyenne des solives de *Thuja* égale à 2,5 m, la contrainte de flexion calculée à l'ELU (σ_{ELU}) est égale à 22,4 MPa et inférieure à la contrainte de flexion admissible proposée dans la littérature (93,8 MPa) (Meier, 2015).

$$\sigma_{ELU} = M_{ELU} Y / I_{zg} \quad (5.1)$$

Où :

M_{ELU} : moment de flexion égal à $P_{ELU} L^2 / 8$

Y: distance entre la fibre neutre et les extrémités de la fibre égale à $D / 2$ (D est le diamètre)

I_{zg} : moment d'inertie en flexion égal à $\pi D^4 / 64$

5.1.3.1 Charges permanentes et d'exploitation

L'agrégat est organisé en différents espaces qui sont codifiés comme suit: «Mx» correspondant au numéro de la maison et «Cy» correspondant au numéro de l'espace (Fig 5.1.5). Les surfaces d'influence sont calculées et attribuées à tous les espaces en spécifiant l'orientation des poutrelles. Les murs porteurs sont codifiés de A à K' (Fig 5.1.6). Les charges permanentes et d'exploitation correspondant aux planchers sont réparties sur les surfaces des murs porteurs en fonction de: (1) l'orientation de la poutrelle, (2) les surfaces d'influence de chaque espace et (3) le nombre d'étages (n). Les résultats sont affichés dans le **Tab 5.1.2**.

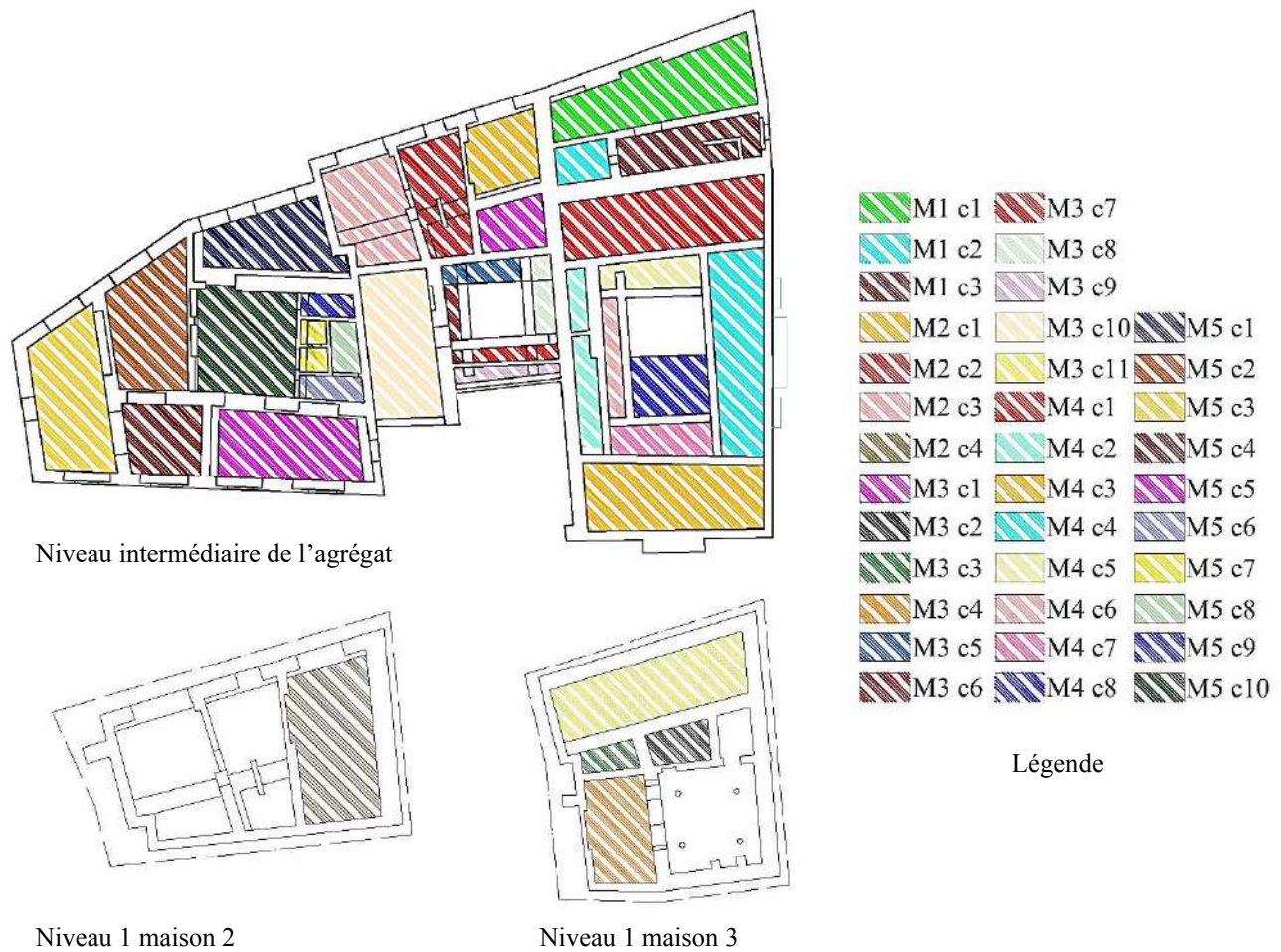


Fig 5.1.5 Codification des espaces (Source : auteur)

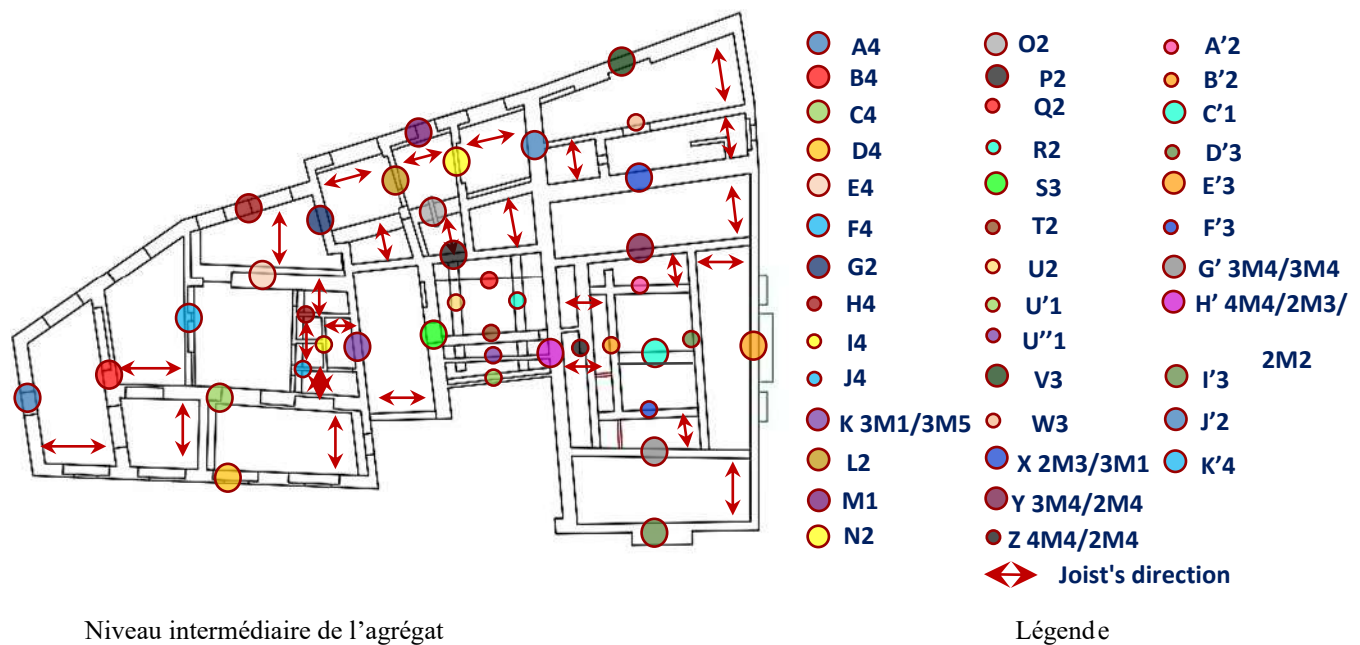


Fig 5.1.6 Direction des solives et codifications des murs porteurs (Source : auteur)

Maison	Espace	Surface (m ²)	P _{ULS} (KN/m ²)	Charge (KN)	Charge/2 (KN)	Mur	e	L	S (mm ²)	Nombre étages			Charge murale (N)	Charge (N/mm ²)
										N1	N2	N3		
M1	C1	14.44	11.30	163.10	81.55	A	600	4300	2.5e6	4	0	0	2.9 e5	0.11
	C2	2.50	11.30	28.24	14.12	B	600	6000	3.6 e6	4	4	0	5.6 e5	0.16
	C3	7.10	11.30	80.19	40.10	C	600	8600	5.1 e6	3	3	3	4.4 e5	0.01
M2	C1	6.42	11.30	72.51	36.26	D	450	8100	3.6 e6	3	3	0	3.3 e5	0.09
	C2	8.15	11.30	92.05	46.03	E	650	5100	3.3 e6	4	4	0	3.5 e5	0.11
	C3	9.57	11.30	108.09	54.05	F	600	4500	2.7 e6	4	0	0	2.5 e5	0.09
	C4	11.15	11.30	125.94	62.97	G	350	4500	1.5 e6	2	0	0	1.0 e5	0.07
M3	C1	3.40	11.30	38.40	19.20	H	150	1900	2.8 e5	4	4	0	7.1 e4	0.25
	C2	1.92	11.30	21.69	10.84	I	120	1800	2.1 e5	3	0	0	2.9 e4	0.14
	C3	2.07	11.30	23.38	11.69	J	120	2100	2.5 e5	4	3	0	7.0 e4	0.28
	C4	9.87	11.30	111.48	55.74	K	900	7900	7.1 e6	3	3	0	2.4 e5	0.03
	C5	2.06	11.30	23.27	11.63	L	350	4100	1.4 e6	2	2	0	2.0 e5	0.14
	C6	1.10	11.30	12.42	6.21	M	450	8100	3.6 e6	1	0	0	9.6 e4	0.03
	C7	1.50	11.30	16.94	8.47	N	300	4400	1.3 e6	2	2	0	1.2 e5	0.10
	C8	2.06	11.30	23.27	11.63	O	550	7400	4.0 e6	2	0	0	1.3 e5	0.03
	C9	2.45	11.30	27.67	13.84	P	300	6700	2.0 e6	2	2	2	9.5 e4	0.05
	C10	12.43	11.30	140.40	70.20	Q	350	3000	1.0 e6	2	0	0	2.3 e4	0.02
	C11	17.16	11.30	193.82	96.91	R	350	2300	8.0 e5	2	0	0	1.2 e4	0.02
M4	C1	15.24	11.30	172.14	86.07	S	550	5300	2.9 e6	3	2	0	2.1 e5	0.07
	C2	4.65	11.30	52.52	26.26	T	350	3700	1.2 e6	2	0	0	3.3 e4	0.03
	C3	14.8	11.30	167.17	83.58	U	350	2300	8.0 e5	2	0	0	2.3 e4	0.03
	C4	12.66	11.30	142.99	71.50	U'	550	3700	2.0 e6	1	0	0	8.4 e3	0.004
	C5	3.67	11.30	41.45	20.73	U''	150	3700	5.5 e5	1	0	0	3.6 e4	0.07
	C6	2.42	11.30	27.33	13.67	V	500	7300	4.3 e6	3	0	0	2.4 e5	0.07
	C7	3.00	11.30	33.89	16.94	W	600	7300	4.3 e6	3	3	3	4.0 e5	0.09
	C8	5.60	11.30	63.25	31.63	X	650	7200	4.6 e6	2	3	0	3.3 e5	0.07
M5	C1	11.17	11.30	126.17	63.08	Y	850	7000	5.9 e6	3	2	0	2.9 e5	0.05
	C2	11.76	11.30	132.83	66.41	Z	600	6600	3.9 e6	4	2	0	1.3 e5	0.03
	C3	13.06	11.30	147.51	73.76	A'	300	3200	9.6 e5	2	0	0	4.1 e5	0.04
	C4	6.48	11.30	73.19	36.60	B'	300	4100	1.2 e6	2	0	0	2.7 e4	0.02
	C5	13.48	11.30	152.26	76.13	C'	700	3500	2.4 e6	1	0	0	3.1 e4	0.01
	C6	1.86	11.30	21.01	10.50	D'	550	5400	2.9 e6	3	0	0	2.1 e5	0.07
	C7	1.73	11.30	19.54	9.77	E'	700	7000	4.9 e6	3	0	0	2.1 e5	0.04
	C8	1.74	11.30	19.65	9.83	F'	300	3200	9.6 e5	3	1	0	8.2 e4	0.09
	C9	1.45	11.30	16.38	8.19	G'	300	6400	1.9 e6	3	3	0	3.0 e5	0.16
	C10	12.50	11.30	141.19	70.59	H'	900	9600	8.6 e6	4	2	2	2.9 e5	0.03
						I'	700	6200	4.3 e6	3	0	0	2.5 e5	0.06
						J'	600	5000	3.0 e6	1	0	0	7.2 e4	0.02
						K'	350	5400	1.8 e6	4	0	0	2.8 e5	0.15

Tab 5.1.2 Calcul des charges appliquées aux murs porteurs (Source : auteur)

5.1.3.2 Charges géostatiques

L'agrégat est implanté comme la majeure partie de la Casbah d'Alger sur un site escarpé d'où l'importance de prendre en considération les charges géostatiques dans l'analyse structurale. La réalisation d'analyses géotechniques et géophysiques du sol à l'aide d'une carotteuse est très difficile pour de nombreuses raisons comme : (1) l'étroitesse des allées et (2) le caractère protégé et classé du site. Cependant, les données pédologiques (type de roche, densité, profondeur des strates...) nécessaires lors du calcul des charges géostatiques, sont obtenues à partir de la littérature en se basant sur une étude antérieure réalisée sur un site adjacent important à savoir la citadelle de la Casbah. Ce dernier a bénéficié d'une étude large et approfondie réalisée dans les années 80 par un bureau d'études polonais (PKZ) spécialisé dans les projets de restauration et de réhabilitation des monuments historiques.

Après la consultation des archives, le document géotechnique retrouvé révèle l'exécution de 8 points de carottage répartis sur le site de la citadelle et son environnement (**Annexe A2**). Le point le plus proche est à 150 m de l'agrégat.

Le document révèle ce qui suit :

1. *«La citadelle est fondée sur des roches de carbonate, constituant des formations métamorphiques, désagrégées dans leur couche supérieure, superficielle.*
2. *Ces formations se caractérisent par leur plissement prononcé avec une disposition alternée de couches dures et compactes et des roches plus faibles.*
3. *Les roches compactes comprennent dans leur composition du dolomite, du calcite, du quartz ainsi que du pyrite et du limonite.*
4. *Les roches plus faibles ce sont les schistes à séricite avec des parties en talc et des filons de quartz, les plans de clivage comprennent de petits filons de calice et de séricite, avec du hématite et du limonite.*
5. *Le tremblement de terre constaté à Alger en 1716 n'a pas causé des modifications dans les couches des fondations.*
6. *Le sol rocheux, constituant la couche directe sous les fondations, est suffisamment stable et n'exige pas de renforcements » (Pulikowski Adam, 1979).*

On considère principalement les deux principales roches présentes, à savoir: la dolomite et le schiste. Les données quantitatives concernant l'épaisseur et la profondeur des strates des différentes roches ne sont pas fournies dans le document, une répartition équitable est alors considérée.

De plus, il est important de se référer à d'autres références pour compléter l'angle de frottement interne ainsi que la densité spécifique de chaque roche. Les données disponibles dans la littérature (**Missoum, 2003**) concernant la configuration des fondations, nous renvoient à la théorie de Coulomb ou de Rankine (**5.2**) pour calculer la poussée des terres (**Fig 5.1.7**) en considérant les paramètres suivants :

1. Le sol est sans cohésion
2. Le sol a une surface horizontale
3. L'écran du mur de soutènement est vertical
4. Le frottement sol-mur est nul.

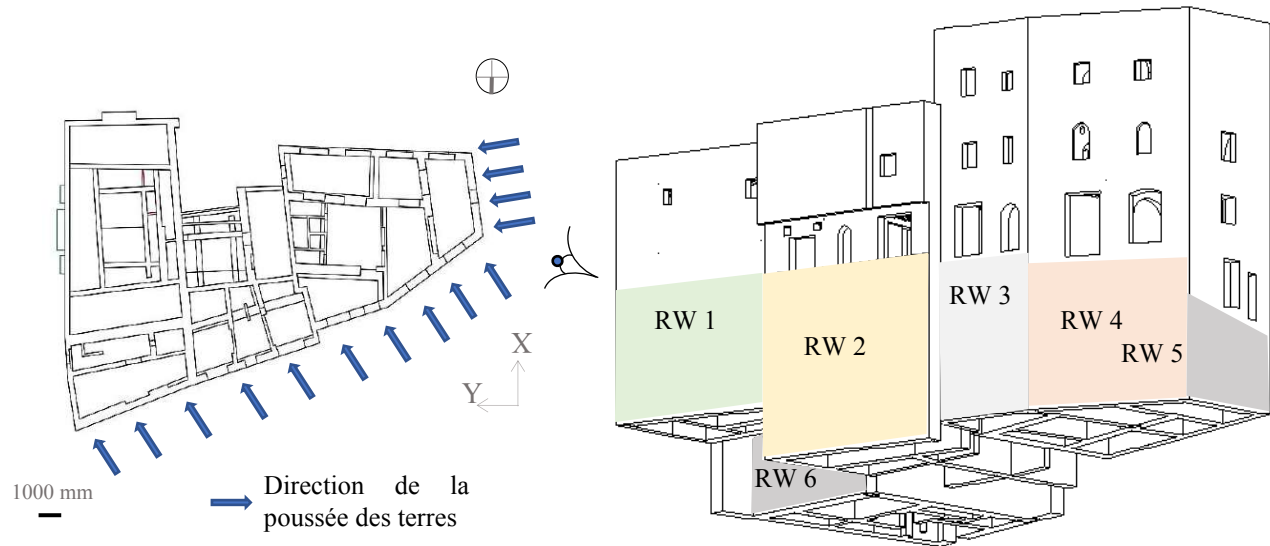


Fig 5.1.8 Distribution des murs de soutènement (Source : auteur)

Mur de soutènement (RW)	Hauteur Z	σ_i	Distribution
	mm	MPa	$f(Z)$
1	5900	0.049	$8.3E-6 Z+0.049$
2	8200	0.068	$8.29E-6 Z+0.06$
3	7200	0.060	$8.33E-6 Z+0.055$
4	6600	0.055	$8.33E-6 Z+0.55$
5	4500	0.037	$8.22E-6 Z+0.037$
6	3400	0.028	$8.23E-6 Z+0.028$

Tab 5.1.4 Calcul de la poussée des terres (Source : auteur)

5.1.4 Paramétrage FEM

Le modèle structurel pour la FEA est importé à partir du programme «Revit» (format ACIS) en sélectionnant le modèle unique avec fusion des régions solides. Toutes les parties sont considérées comme des éléments solides 3D, y compris les éléments de chaînage en bois. En effet, ces derniers n'ont pas pu être modélisés en tant que « Poutre filaire » (*beam wire*)(1 Dimension) en raison des irrégularités géométriques de l'agrégat, leur positionnement exact n'a pas pu être réalisé. Cependant, pour plus de précision et pour garantir un emplacement exact, les éléments en bois sont importés de Revit en tant qu'éléments solides. Les propriétés des matériaux utilisés pour le LSA sont résumées dans le [Tab 5.1.5](#). Plus de détails sur les propriétés mécaniques des matériaux de construction sont fournis dans la [Section 5.2.3.1](#) et la [Section 5.4.3](#).

Matériaux	Densité	Module de Young	Coefficient de Poisson
	T/mm^3	MPa	/
Murs: Maçonnerie en briques	2E-09	2450	0.22
Colonnes: Tuf	1.27E-09	5070	0.28
Thuja	6.8E-10	6840	0.38

Tab 5.1.5 Caractéristiques mécaniques des matériaux de construction (Source : auteur)

Nous choisissons «*Tie*» comme contrainte entre arcade / colonnes et arcs / chaînage en bois, les surfaces esclaves (*slave*) et maîtres (*master*) sont affichées dans la Fig 5.1.9. Compte tenu de la composition rocheuse du sous-sol, les déplacements et rotations des murs de soutènement ainsi que les fondations sont considérés comme nuls.

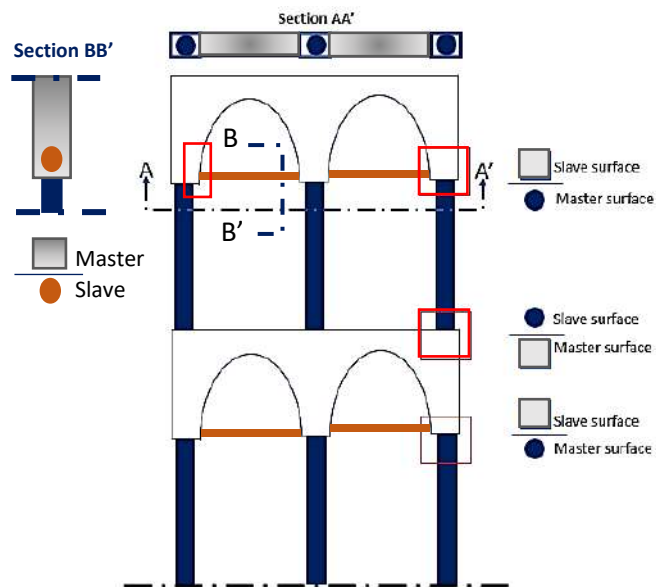


Fig 5.1.9 détails sur les contraintes (Source : auteur)

Afin de réaliser la LSA, nous avons sélectionné un nombre maximum d'incréments égal à 1E6 avec une durée initiale et minimale respectivement égale à 0,01 et 1E-7s.

Le modèle structurel agrégé est maillé comme suit (Fig 5.1.10):

- 1- Le type tétraédrique (TET) pour les murs porteurs d'une taille de 800 mm.
- 2- Le type hexagonal (HEX) pour les colonnes d'une taille de 170 mm.
- 3- Le type hexagonal (HEX) pour les éléments de chaînage d'une taille de 80 mm.
- 4- Le type hexagonal (HEX) pour les poutrelles *Thuja* qui ne sont pas incluses dans LSA mais dans l'analyse modale et Pushover avec une taille variant de 120 à 190 mm.

Le nombre total de nœuds générés est égale à 143104.

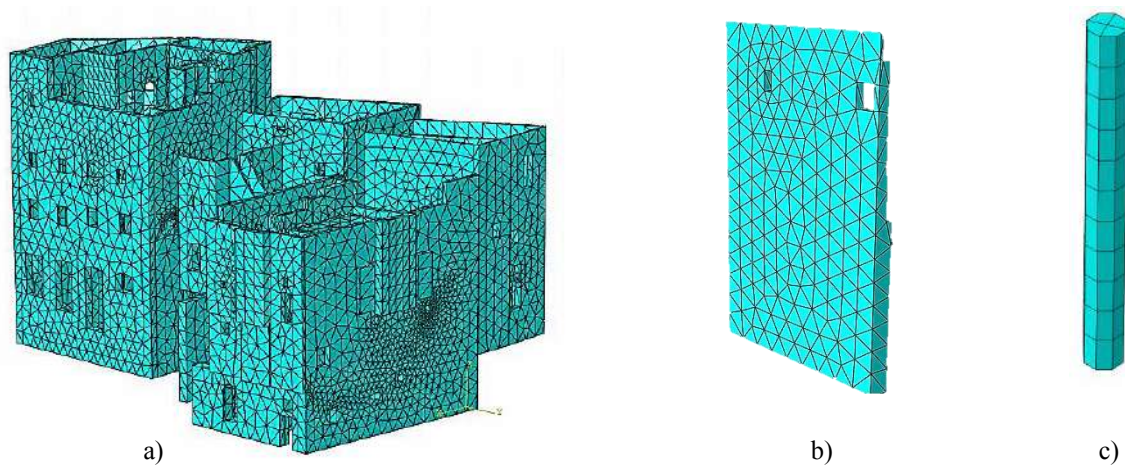


Fig 5.1.10 configuration du maillage (Source : auteur)

a) maillage général d'agrégat, b) exemple de maillage tétraédrique pour les murs, c) exemple de maillage hexagonal pour les poteaux, éléments de chaînage et solives.

5.1.5 Analyse Linéaire Statique : résultats

Les résultats de l'analyse linéaire statique ont pu être obtenus après une durée de 2h en utilisant 8 processeurs. Les résultats montrent une bonne réponse structurelle générale de l'agrégat dans la phase statique élastique. Les déplacements les plus importantes sont notés comme suit:

1. La 3^{ème} maison: fléchissement des galeries entourant le patio (**Fig 5.1.11 D3**) avec un déplacement selon l'axe Z égale à 2 mm.
2. La 4^{ème} maison: fléchissement des galeries entourant le patio (**Fig 5.1.11 D1**) avec un déplacement selon l'axe Z égale à 2,7 mm. De plus, un hors plan et une rotation des trois façades composant la maison suivant les axes X et Y (**Fig 5.1.11 D1 / D2**). Le déplacement est d'environ 1,5 mm (**Fig 5.1.12**).
3. La 5^{ème} maison: défaillance de l'angle supérieur qui représente la partie la plus élevée de l'agrégat. Le déplacement est égale à 2,4 mm (**Fig 5.1.11 D4**).

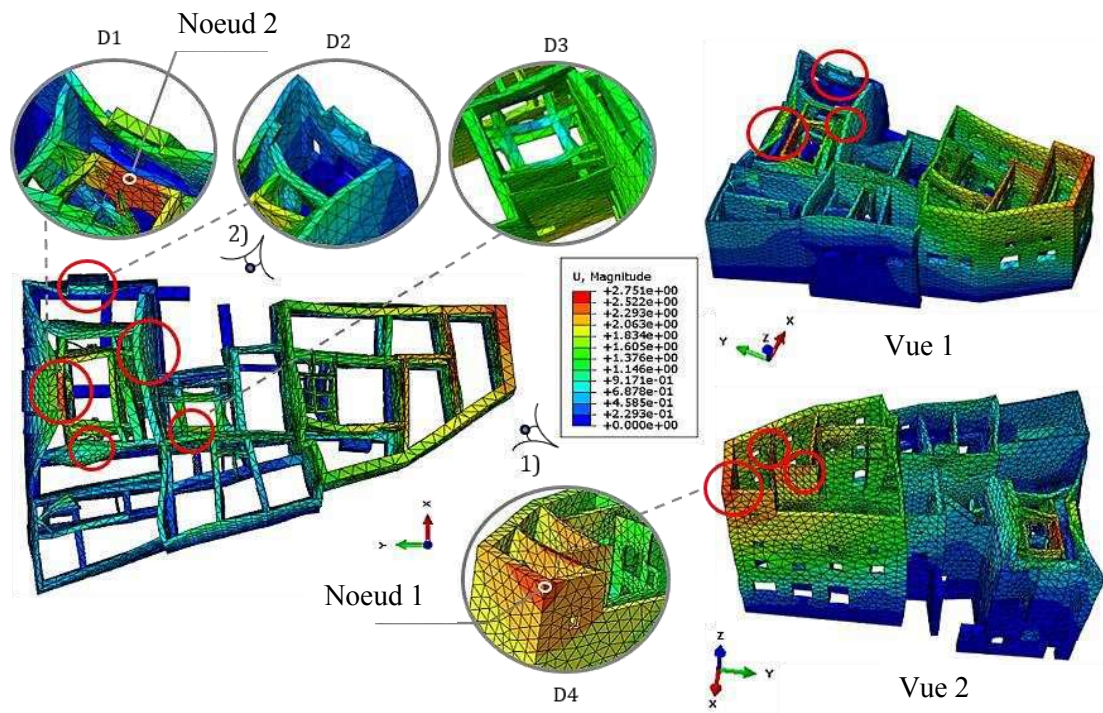


Fig 5.1.11 Résultats de l'Analyse Linéaire Statique (déplacement en mm) (Source : auteur)

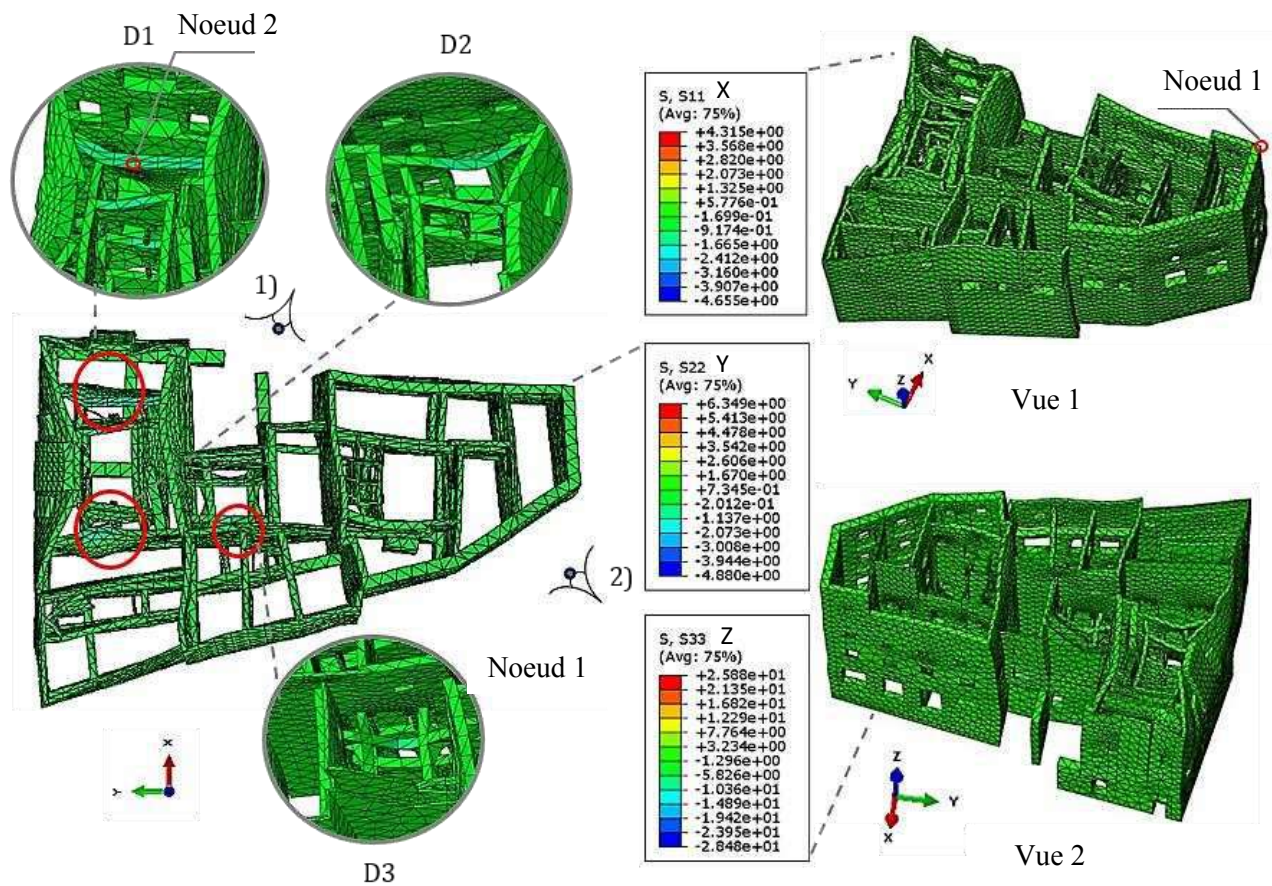


Fig 5.1.12 Résultats de l'Analyse Linéaire Statique (contrainte en MPa) (Source : auteur)

Avec une moyenne de 0,3 MPa enregistrée au nœud 1 (**Fig 5.1.13**), la contrainte de compression générale générée est très faible par rapport à la résistance à la compression de la maçonnerie qui est égale à 5,8 MPa. En revanche, une contrainte de traction maximale (D1, D2 et D3 sur la **Fig 5.1.11**) estimée à 0,3 MPa est notée selon l'axe Y dans les galeries entourant les patios (Nœud 2) en (**Fig 5.1.13**) dont la résistance à la traction de la maçonnerie est égale à 0,4 MPa.

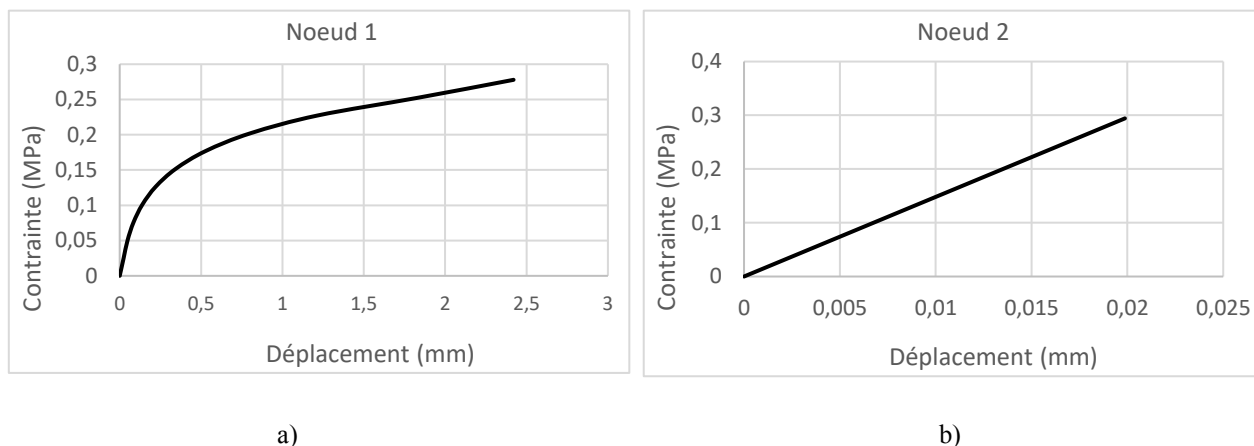


Fig 5.1.13 a) Courbe contrainte / déformation générale de compression, b) Courbe contrainte / déformation de traction le long de la direction Y (Source : auteur).

Les résultats de l'analyse indiquent un hors plan et une rotation des façades principales de la quatrième maison (**Fig 5.1.11**). En effet, les éléments en porte-à-faux (encorbellement) appelés «K'bou» (**Fig 5.1.4**) représentent une masse importante fixée sur les façades, qui sous des charges plus importantes, peuvent générer une rotation autour de l'axe parallèle aux murs. De plus, la configuration en gradins des murs porteurs (**Fig 5.1.2**) génère une rotation dans le sens des gradins.

Les parties supérieures de l'agrégat, en particulier le niveau supérieur de la maison 5, indiquent l'éventuelle présence d'un mécanisme de rupture des angles sous l'effet d'une charge importante (**Fig 5.1.11**). On note également la présence d'un fléchissement dans la clé de voûte des arcs entourant les patios dans le sens de l'intrados (**Fig 5.1.11**) et (**Fig 5.1.12**).

Cette analyse démontre une très bonne réponse structurale de l'agrégat dans le domaine élastique avec une déformation réduite par rapport à sa capacité de résistance. Les anomalies préliminaires observées peuvent être accentuées dans le domaine élasto-plastique et sous l'effet de la force sismique. Les parties les plus vulnérables de l'agrégat serviront de référence lors de l'analyse sismique Pushover pour la sélection des points de contrôle.

5.2 Analyse Pushover (PA): théorie

5.2.1 Introduction

La ville d'Alger est située sur six failles terrestres et marines (Boughazi, et al., 2014) (Fig 5.2.1), ce qui la classe dans la zone la plus sismique du pays, à savoir la zone III, (Fig 5.2.2) avec un PGA de 0,4 (RPA, 2003).

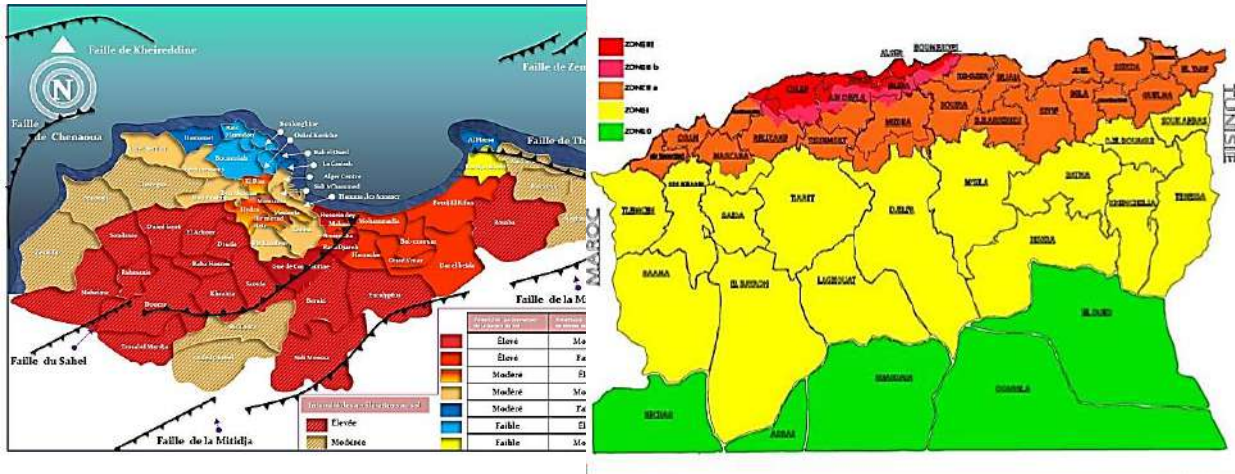


Fig 5.2.1 à gauche: les six failles entourant la ville d'Alger (Source: (Boughazi, et al., 2014))

Fig 5.2.2 à droite: répartition des zones sismiques en Algérie (Source: (RPA, 2003))

La partie centrale du pays (Alger et ses environs) a connu plusieurs événements sismiques majeurs comme mentionné dans le Tab 5.2.1. Le tremblement de terre de 1716 représente l'un des plus dévastateurs avec une intensité estimée à IX sur l'échelle de Richter qui représente le séisme historique le plus cité dans les travaux de recherche et catalogues antécédents (Ayadi, et al., 2015) (Harbi, et al., 2007) (Oussadou, 2002) (Benhallou, 1985) (Vogt, 1984) (Perrey, 1847) (Roussel, 1973).

Date	Localisation	Intensité
Jan,3 1365	Alger	X
Dec,31 1658	Chenoua, située à 70 km d'Alger	VIII
Mar,10 1673	Alger	VIII
Fev,3 1716	Alger	IX
Mar, 2 1825	Blida, située 50 km d'Alger	X-XI
Oct, 31 1989	Tipaza, située 70 km d'Alger	VIII
Mai, 21 2003	Boumerdès située à 45 km d'Alger	X
Mai, 27 2003	Alger	/
Aou,1 2014	Alger	VI

Tab 5.2.1 Quelques événements sismiques les plus importants durant la période 1365-2020 (Source : auteur)

Ces références historiques sont importantes pour expliquer le degré de vulnérabilité sismique des sites historiques de la région, en particulier la Casbah d'Alger.

Il convient de rappeler que la Casbah d'Alger est construite principalement en maçonnerie, à base de briques en terre cuite avec des dimensions typiques d'environ $26 \times 12,5 \times 3 \text{ cm}^3$, et des joints de mortier de chaux et d'argile rouge dont l'épaisseur varie de 3-3,5 cm (Giovanetti, 1992).

La composition des planchers supportés par les rondins de *Thuja* a déjà été décrite dans la [Section 5.1](#) dédiée à l'analyse linéaire statique, mais il convient tout de même de souligner deux détails importants :

1. Les rondins de *Thuja* sont encastrés sur toute l'épaisseur des murs porteurs ;
2. Un décalage en hauteur de la mesure du diamètre du rondin de *Thuja* est assuré entre les planchers de même niveau afin de maintenir la continuité du mur porteur (Giovanetti, 1992).

Ces détails sont importants car ils permettent la paramétrisation du modèle pour l'analyse sismique qui sera expliquée dans les sections suivantes.

Afin de réduire la vulnérabilité des bâtiments historiques face aux facteurs d'altération endogènes et exogènes à travers une intervention structurelle adaptée, il est essentiel et recommandé d'effectuer une analyse structurelle au préalable.

La complexité des bâtiments historiques en maçonnerie repose principalement sur trois paramètres: (1) la typologie constructive, (2) les matériaux de construction et (3) les typologies architecturales. La réponse structurelle sismique de ce type de structure mérite d'être approfondie davantage en raison du nombre relativement restreint de recherches à son propos contrairement à d'autres typologies constructives en acier ou en béton à titre d'exemple. « *Le comportement mécanique des structures en maçonnerie est l'une des questions les plus difficiles de l'ingénierie structurelle et est un domaine de recherche actif* » (Clementi, et al., 2016).

La persistance d'un héritage architectural construit principalement en maçonnerie jusqu'à nos jours, représente une preuve tangible de la stabilité statique et de l'efficacité du système constructif vis-à-vis des charges gravitationnelles (charges permanentes et d'exploitation). Néanmoins, des événements naturels récents, comme le tremblement de terre d'Émilie-Romagne en Italie en 2012, ont démontré les performances réduites des bâtiments historiques en maçonnerie à contrecarrer les excitations horizontales (Clementi, et al., 2016).

5.2.2 Analyse Pushover: théorie

Il existe plusieurs méthodes d'analyse pour évaluer le comportement sismique des constructions en général, dont la plus complète est l'analyse dynamique non linéaire. L'exécution potentielle de ce type d'analyse repose sur trois aspects :

1. Connaissance approfondie de l'analyse dynamique et de la réponse non linéaire des structures,
2. Disponibilité des données suivantes :
 - a. La configuration architecturale et géométrique du bâtiment,
 - b. La loi de comportement des matériaux de construction,

- c. Les accélérographes d'un séisme récent représentatif dont l'épicentre est situé dans la même zone géographique que le bâtiment à analyser,
3. Une plateforme de calcul avec des performances élevées.

D'autre part, la principale caractéristique des structures en maçonnerie historiques est l'hétérogénéité des matériaux de construction qui fait de l'analyse dynamique non linéaire un travail difficile: *«la modélisation numérique à travers le FEM est une tâche très exigeante en termes de calcul en raison de deux aspects différents: d'une part les caractéristiques typologiques des bâtiments en maçonnerie ne permettent pas de se référer à des schémas statiques simplifiés, d'autre part les propriétés mécaniques du matériau conduisent à un comportement largement non linéaire dont la prédiction peut être très délicate »* (Giordano, et al., 2002).

Ces dernières années, une méthode alternative, appelée «Pushover» ou analyse statique non linéaire, plus adaptée à l'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments historiques en maçonnerie a été introduite dans diverses réglementations et codes de bonnes pratiques, tels que: le Code sismique européen (EN1998) et le règlement sismique italien (NTC).

Ce type d'analyse sera expliqué en détail dans les sections suivantes.

5.2.2.1 Définition

L'analyse Pushover (PA) ou l'analyse statique non linéaire est une alternative efficace à l'analyse dynamique non linéaire pour effectuer des analyses sismiques. En ce qui concerne ce dernier, la PA nécessite en effet des calculs plus simples afin d'évaluer la capacité de résistance d'une structure au-delà de sa limite élastique (état limite) jusqu'à atteindre sa résistance ultime dans le domaine post-élastique sous charges sismiques.

Bien que l'analyse statique linéaire permet d'obtenir les premières indications sur la capacité élastique des structures et montre où les premières anomalies pourraient se produire, elle ne peut pas prendre en compte la redistribution des efforts due à la réponse post-élastique progressive et prédire les mécanismes de rupture, ou détecter les localisations possibles d'une défaillance prématurée (Leslie, 2012). En revanche, l'AP peut prédire ces aspects et permet de :

1. Identifier les parties susceptibles d'atteindre des états critiques lors d'un tremblement de terre.
2. Démontrer comment la défaillance progressive des bâtiments se produit réellement et identifier le mode de défaillance finale.
3. Prédire la présence de parties potentiellement plus faibles au sein de la structure (Leslie, 2012). *« [...] La Pushover offre une alternative efficace aux analyses dynamiques non linéaires informatiques coûteuses et peut néanmoins offrir des informations utiles et efficaces sur l'état de dommages que le bâtiment peut développer sous des charges sismiques »* (Clementi, et al., 2016).
4. Estimer les mécanismes plastiques attendus et la répartition des dégâts (Urbanski , et al., 2007).

5.2.2.2 Approche du degré de liberté unique (SDOF)

L'une des simplifications et hypothèses fondamentales de l'AP est la conversion du Multi Degré de Liberté (MDOF) de la structure en SDOF.

Considérer le bâtiment comme un système SDOF, ce qui est vraiment très dur, signifie que le modèle de structure, avec plusieurs niveaux à masses localisées, est supposé être équivalent à un seul mât fixé à la base avec une masse unique et considérable localisée à l'extrémité supérieure (**Fig 5.2.3**).

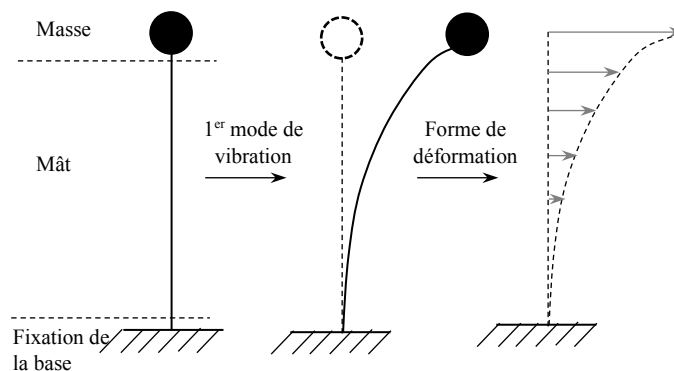


Fig 5.2.3 Système de Degré de Liberté Unique SDOF (Source : auteur)

Cette hypothèse n'est pas hasardeuse, car le premier mode de vibration d'une structure avec un système SDOF implique la masse effective la plus importante dont la déformation générée prend la forme d'un triangle inversé (**Fig 5.2.3**). De la même manière, un système de structure MDOF à degrés de liberté multiples suit la même forme de déformation pendant le premier mode de vibration impliquant la plus grande masse effective de la structure tel que démontré par l'analyse modale développée dans la **Section 5.3.3**.

Par conséquent, le premier mode de vibration implique la plus grande masse effective pour les deux systèmes respectant la même forme de déformation. Le déplacement maximal absolu du système SDOF est alors pris comme déplacement cible.

Cependant, lors de l'analyse Pushover, la structure répondra au premier mode de vibration. La forme de la déformation du bâtiment reste inchangée pendant la réponse sismique et peut être représentée par un triangle inversé. Cette dernière provient du chargement horizontal croissant dû à la force sismique appliquée (**Fig 5.2.4**).

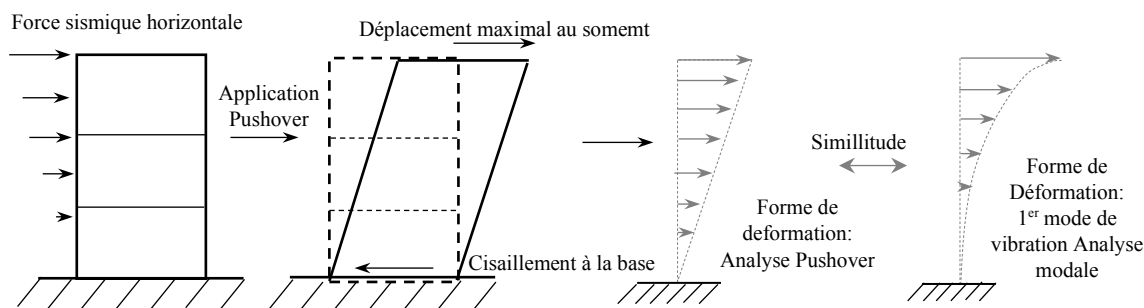


Fig 5.2.4 Forme de déformation : PA vs vibration du premier mode (Source : auteur)

5.2.2.3 PA et la Méthode de Capacité Spectrale CSM

L'évaluation des performances sismiques des structures générales, et notamment des bâtiments historiques en maçonnerie, à travers une approche mécanique simplifiée basée sur l'analyse PA et la Méthode de Capacité Spectrale (CSM) (Freeman, 1998), représente une approche actuelle proposée par plusieurs codes sismiques. En fait, une performance sismique positive « *nécessite le bon appariement de deux grandeurs de base, la capacité sismique et la demande sismique. La demande est une description des effets du mouvement du sol du tremblement de terre sur le bâtiment. La capacité est une représentation de la capacité du bâtiment à résister aux effets sismiques. La performance est mesurée par la manière dont la capacité est capable de gérer la demande* » (Tso, et al., 1998).

La CSM a été conçue pour considérer le comportement non linéaire des structures à travers leur courbe de capacité (Freeman, et al., 1975), qui peut être obtenue par le résultat de la PA. « *La demande sismique peut alors être estimée, en termes de déplacement spectral (point de performance), en croisant le spectre de capacité (la courbe de capacité tracée en termes d'accélération et de déplacement spectraux) avec le spectre de réponse au séisme, tracé au format AD (accélération vs déplacement)* » (Galasco, et al., 2006).

La demande sismique peut être déterminée pour un système SDOF équivalent à partir d'un spectre de réponse inélastique (Fajfar, 2018). La courbe de capacité du système MDOF obtenue à partir d'une PA et tracée en termes de cisaillement de base (F_b) et de déplacement au sommet (d_n) pour chaque point de contrôle (Section 5.2.1.5), doit être transformée en un système SDOF équivalent (relation entre la force élasto-parfaitement plastique idéalisée (F^*) et le déplacement (d^*)) (EN 1998-1, 2004).

La force (F^*) et le déplacement (d^*) du SDOF équivalent sont calculés à l'aide des formules (5.3) et (5.4).

$$F^* = F_b / \Gamma \quad (5.3)$$

$$d^* = d_n / \Gamma \quad (5.4)$$

Où:

Γ est le facteur de transformation donné par:

$$\Gamma = m^* / \sum m_i \phi_i^2 \quad (5.5)$$

m^* est la masse d'un système SDOF équivalent donnée par:

$$m^* = \sum m_i \phi_i \quad (5.6)$$

m_i est la masse du $i^{\text{ème}}$ étage

ϕ_i représente les déplacements normalisés ($\phi_n = 1$, où n est le nœud de contrôle au niveau du toit).

La courbe de capacité mise à l'échelle sur F^* - d^* est convertie dans un premier temps en loi bi-linéaire puis convertie en courbe AD Accélération-Déplacement. Cette dernière est appelée capacité spectrale et obtenue en se basant sur la formule (5.7).

$$S_e = F^* / m^* \quad (5.7)$$

La demande sismique linéaire est obtenue à partir de (EN 1998-1, 2004) en se basant sur la période de vibration (T) du système linéaire à un degré de liberté unique SDOF.

La demande spectrale sismique est ensuite tracée en termes d'accélération (S_e) et de déplacement (d_{et}^*) en se basant sur la formule (5.8) ou sur le site-web « Eurocode applied » (Eurocode 8, 2017).

$$d_{et}^* = S_e(T^*) [T^* / 2\pi]^2 \quad (5.8)$$

Où :

T^* est la période élastique du système SDOF équivalent idéalisé donné par la formule (5.10).

Comme dernière étape, les courbes de demande et de capacité sont tracées au format ADRS (Accélération Déplacement Réponse Spectrale). « Ce spectre de demande se superpose au spectre de capacité pour trouver leur point d'intersection qui correspond à une condition pour laquelle la capacité sismique est égale à la demande imposée à la structure. Ce point est appelé « point de performance » qui est une estimation du déplacement maximal réel attendu lors d'un tremblement de terre anticipé » (Fawad, 2017). Le processus global est illustré dans la Fig 5.2.5.

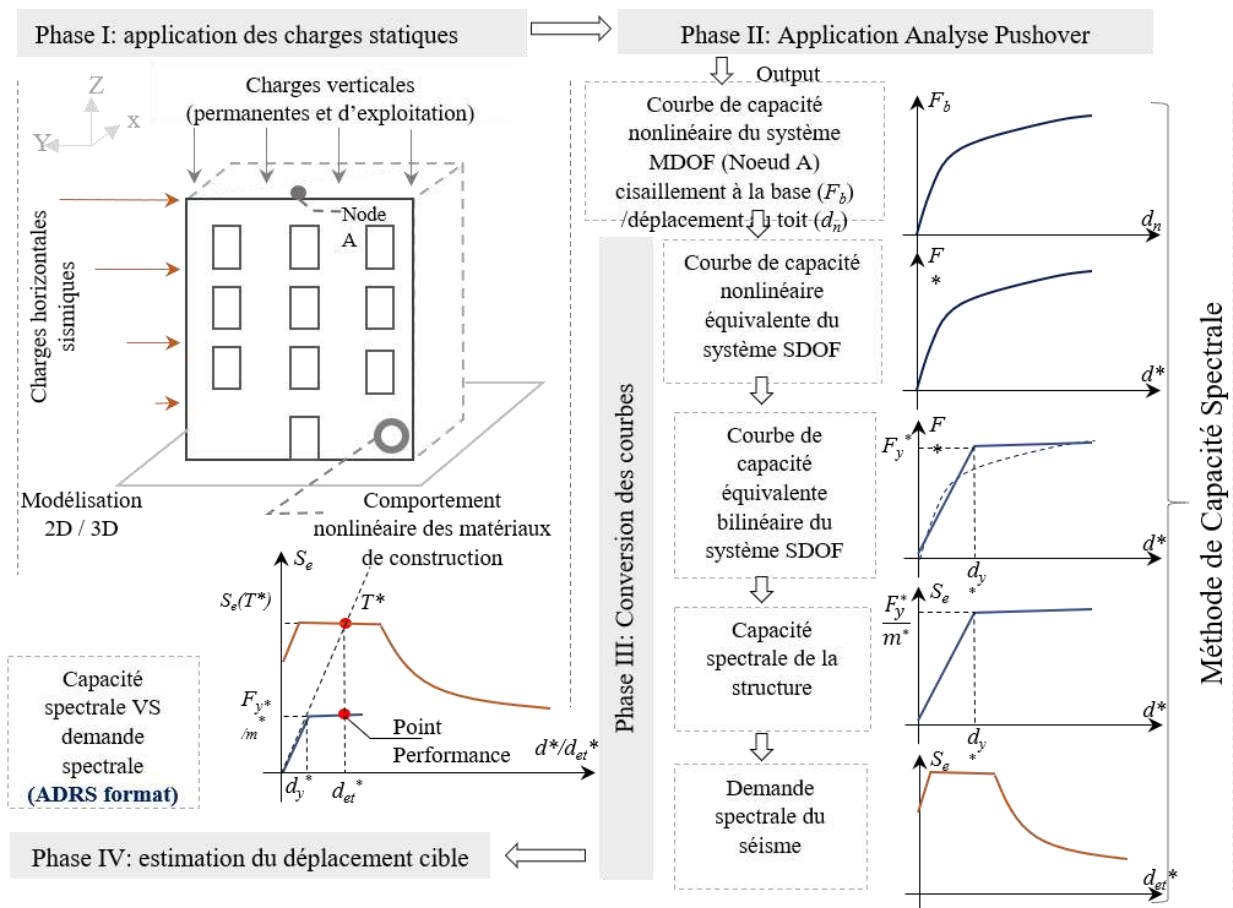


Fig 5.2.5 PA et la Méthode par Capacité Spectrale CSM (Source : auteur)

5.2.2.4 Déplacement cible

Le déplacement cible qui représente l'un des composants essentiels de l'AP, peut être déterminé graphiquement sur la courbe ADRS en suivant les étapes expliquées dans la (Fig 5.2.5), ou par voie analytique.

Premièrement, à partir de la courbe du système SDOF idéalisé, nous obtenons la force d'élasticité F_y^* qui représente la résistance ultime du système idéalisé, elle est égale à la force de cisaillement à la base lors de la formation du mécanisme plastique (EN 1998-1, 2004). Ce dernier est représenté par le point A sur la Fig 5.2.6 qui correspond à l'intersection entre la courbe de capacité équivalente non linéaire et bilinéaire du système SDOF.

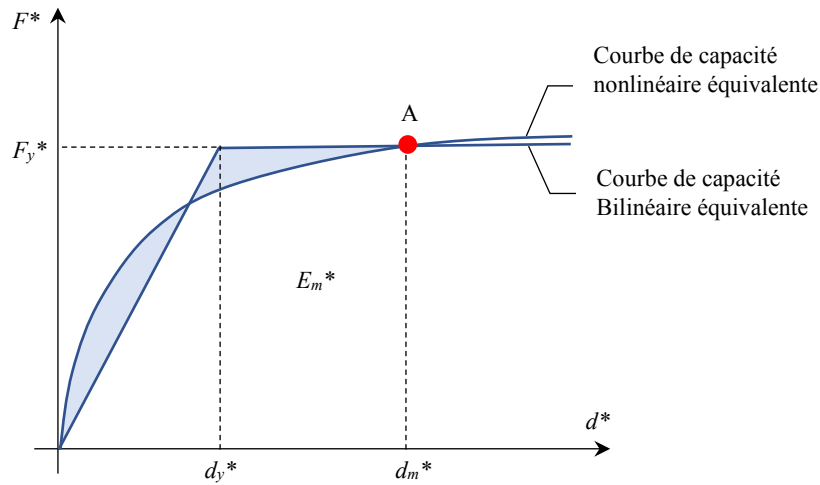


Fig 5.2.6 Les courbes non linéaires et bilinéaires idéalisées du système SDOF (Source: auteur)

Le déplacement d'élasticité d_y^* du système SDOF idéalisé est donné par:

$$d_y^* = 2(d_m^* - E_m^*/F_y^*) \quad (5.9)$$

Où:

E_m^* est l'énergie de déformation réelle jusqu'à la formation du mécanisme plastique.

d_m^* est le déplacement élastique correspondant au point A (mécanisme plastique).

Deuxièmement, la période élastique du système linéarisé (T^*) est calculée comme suit:

$$T^* = 2\pi\sqrt{m^*/(F_y^*/d_y^*)} \quad (5.10)$$

Troisièmement, la détermination du déplacement de la cible pour le système SDOF idéalisé est calculée en utilisant la formule (5.8).

5.2.2.5 Points de contrôle CP

Le point de contrôle est défini comme le point matériel de la structure et supposé caractériser le comportement global. En général, pour les structures simples telles que les tours, les palais et les bâtiments réguliers en plan et en élévation, le CP coïncide avec le point ayant l'élévation la plus élevée ou avec le centre de masse au dernier étage.

L'Analyse Pushover, si elle est appliquée à des bâtiments non réguliers en plan et en élévation et avec des planchers déformables, plusieurs CP doivent être sélectionnés (Marelli, 2019). Ces derniers sont choisis en fonction des parties les plus faibles de la structure où l'on s'attend à la fissuration et à la plus forte intensité, de sorte qu'ils présentent un déplacement en flexion ou en cisaillement plus important. Dans la plupart des cas, les points de contrôle sont situés aux niveaux supérieurs de la structure, aux extrémités des poutres et des colonnes et sur les diagonales des diaphragmes, où des fissures croisées sont susceptibles de se produire (Leslie, 2012).

Une analyse statique linéaire est une étape utile et importante avant le lancement de la PA, car elle permet de détecter uniquement les parties les plus vulnérables de la structure sous des charges permanentes et d'exploitation.

5.2.3 Analyse Pushover : considérations

5.2.3.1 Propriétés mécaniques des matériaux de construction

Une analyse structurale fiable, capable de bien saisir le comportement structurel d'une construction, ne peut être réalisée sans une bonne connaissance des propriétés mécaniques des matériaux de construction et de leur réponse composite. Il s'agit d'une étape clé lors de la mise en place du modèle structurel, quel que soit le type d'analyse à développer.

Le comportement général des matériaux peut être divisé principalement en trois phases (Fig 5.2.7), à savoir:

- 1- Le comportement linéaire ou domaine élastique [A-B], dans lequel la déformation est proportionnelle à la contrainte appliquée et le matériau retrouve son état initial après déchargement, sans aucun phénomène irréversible.
- 2- Le comportement non linéaire [B-D] suite au dépassement de la limite élastique, dans lequel la déformation devient disproportionnée à la contrainte appliquée et le matériau ne retrouve pas ses configurations initiales après déchargement, subissant une déformation irréversible.
- 3- La phase de rupture (effondrement / fracture) [D-E], dans laquelle une instabilité du matériau survient sous forme d'éclatement pour les matériaux rigides ou de localisations de déformation pour les matériaux ductiles.

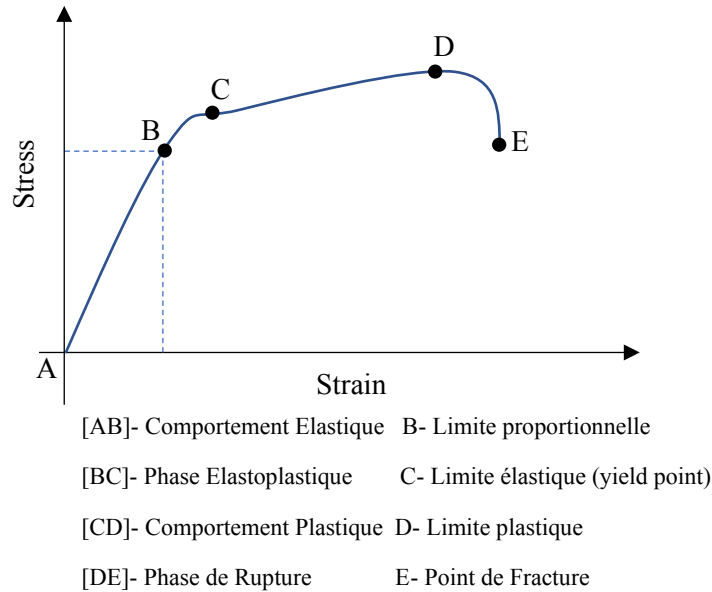


Fig 5.2.7 Comportement général des matériaux (Source : auteur)

Dans l'analyse PA, la structure est soumise à un certain nombre de charges qui la « poussent » au-delà de sa limite élastique dans la réponse non linéaire, jusqu'à un état de rupture (Giordano, et al., 2002).

Cependant, il est obligatoire de prendre en compte le comportement non linéaire des matériaux de construction lors de la configuration du modèle structurel, en spécifiant leur mode de défaillance final.

Sur la base de la littérature, le critère de rupture CDP *Concrete Damage Plasticity* est recommandé et utilisé dans l'analyse non linéaire des structures en maçonnerie (Acito, et al., 2016) (B. Habieb, et al., 2017). En effet, le modèle CDP est diffusé dans les codes commerciaux et peut être utilisé pour les blocs (unité de pierre ou de brique) et le mortier. Le modèle CDP - présent dans la galerie des matériaux standards Abaqus - est bien documenté et fournit une description appropriée du comportement non linéaire des matériaux cassants ou quasi cassants tels que le béton, le mortier et la brique (Ghiassi, et al., 2019).

Le CDP permet de décrire les dommages irréversibles qui se produisent pendant le processus de fracturation des matériaux fragiles en fonction de leur comportement non linéaire en compression et en traction (phase CE sur la Fig 5.2.7). Tel que défini dans (Smith, 2009), d'autres paramètres doivent être définis pour appliquer la théorie CDP développée par Lubliner, Lee et Fenves qui sont : l'angle de dilatation (ψ), l'excentricité (ϵ), la viscosité (μ), le rapport de la limite d'élasticité en compression équibiaxiale initiale et la limite d'élasticité en compression uniaxiale initiale (F_{b0} / f_{c0}) et enfin le rapport du deuxième invariant de contrainte sur le méridien de traction à celui du méridien de compression (K).

Un autre aspect essentiel des matériaux à considérer en PA, est l'anisotropie mettant en évidence la texture des maçonneries dans les murs porteurs. La maçonnerie historique est composée de blocs (briques ou pierre) qui sont assemblés et reliés par un mortier de jointoiement (Fig 5.2.8).

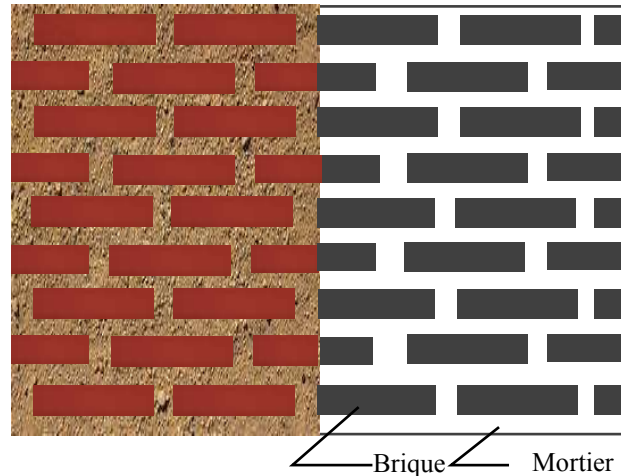


Fig 5.2.8 Mur de maçonnerie traditionnelle (briques / mortier) (Source : auteur)

La discontinuité de la maçonnerie due à la présence des joints de mortier et à la géométrie alignée horizontalement des briques représente les principales sources d'anisotropie. Dans la modélisation par éléments finis FEM, il est possible d'utiliser différentes stratégies pour représenter la maçonnerie, en fonction (1) du niveau de précision, (2) du niveau de simplicité et (3) de l'échelle d'analyse (Milani, et al., 2015).

Selon (Giordano, et al., 2002) et (Milani, et al., 2015), toutes ces stratégies peuvent être classées en trois catégories, à savoir :

1. Micro-modélisation ou «approche bi-matériaux» : est basée sur la représentation exacte des briques et du mortier, avec une attention particulière dédiée à la modélisation des joints, qui est souvent à l'origine de la propagation des fissures.

Cette approche nécessite une discrétisation fine, affectant la complexité de l'analyse, elle est inapplicable pour un bâtiment entier.

2. La démarche d'homogénéisation : est basée sur la création d'un matériau orthotrope homogène fictif (FHOM) sur la base des propriétés mécaniques d'une cellule unitaire appropriée représentant la géométrie complexe de la maçonnerie. La sélection des cellules unitaires représentatives est généralement critique en raison du type de la texture de la maçonnerie, ce qui pourrait nécessiter de tenir compte de l'hétérogénéité.
3. Macro-modélisation ou «approche par matériaux équivalents» : suppose que la maçonnerie est un continuum de matériaux homogène (isotrope ou orthotrope) reproduisant un comportement moyen d'éléments uniques, saisissant les principaux aspects du comportement global mais sans le nombre de paramètres et l'effort de calcul requis par la micro-modélisation. Cependant, les tests de laboratoire de caractérisation des matériaux sur des éléments uniques (séparés) sont obligatoires.

L'approche de macro-modélisation est la plus adaptée pour l'AP appliquée sur des bâtiments historiques complexes en maçonnerie nécessitant des calculs à grande échelle, comme la Casbah d'Alger.

5.2.3.2 Charges

Dans l'AP, deux types de charges statiques sont appliqués à la construction et doivent être pris en compte, à savoir :

5.2.3.2.1 Charges permanentes et d'exploitation

La PA est réalisée en deux étapes principales (S1) et (S2) dans lesquelles les charges sismiques latérales (Ex) et (Ey) sont appliquées séparément et en suivant les axes X et Y respectivement. Les charges permanentes (DI) et d'exploitations (LI) peuvent être réduites ou négligées pendant l'AP qui dépendent de chaque code structurel ou norme technique. Ceci est lié à l'hypothèse probabiliste selon laquelle ces charges ne sont pas pleinement présentes lors de l'événement sismique (Mallardo, et al., 2008), (O.P.C.M, 2005). Le tableau suivant (Tab 5.2.2) représente les différentes combinaisons de charges à prendre en compte lors de l'AP proposée par le RPA.

Etape		S1			
Charges		Charge Verticale		Charge Sismique	
		DI	LI	Ex	Ey
Coefficient	Combinaison 1	1	1	±1	0
	Combinaison 2	0.8	0	±1	0

Etape		S2			
Charges		Charge Verticale		Charge Sismique	
		DI	LI	Ex	Ey
Coefficient	Combinaison 1	1	1	0	±1
	Combinaison 2	0.8	0	0	±1

Tab 5.2.2 Coefficient de chargement appliqué lors des étapes de l'AP (Source : auteur).

5.2.2.2.2 Charges géostatiques

Les charges géostatiques représentées par la poussée du sol (σ) sont expliquées et illustrées dans la (Section 5.1.2.2), les mêmes valeurs sont utilisées dans l'AP.

5.2.2.2.3 Charges sismiques

Le calcul des charges sismiques pour l'application d'une PA est expliqué dans l'annexe informative B de la norme « Eurocode 2008 » (EN 1998-1, 2004). Pour calculer la force sismique horizontale par voie analytique, on suppose la relation suivante entre les efforts latéraux normalisés F_i et les déplacements normalisés δ :

$$F_i = m_i \delta_i \quad / \quad F_n = m_n \delta_n \quad (5.11)$$

Où:

m_i : est la masse du i-ème étage.

Les déplacements sont normalisés de telle manière que $\delta_n = 1$, où n désigne le nœud de contrôle au niveau du toit.

La force sismique pourrait être générée en appliquant une accélération horizontale dans les directions X et Y lors de l'exécution d'une simulation numérique sur un modèle solide 3D. On suppose que lorsqu'une accélération en (m/s^2) rencontre une masse en (Kg), une force en (N) est générée conséquemment. Cependant, le poids propre de la structure subira deux types d'accélération : (1) une accélération verticale due à la gravité et (2) une accélération horizontale due à l'effet sismique. L'accélération de départ (A) est égale à $1\text{m} / \text{s}^2$ (PGA 0,1g) au niveau supérieur (n) où la hauteur du bâtiment (Zi) atteint le sommet. Nous augmentons progressivement l'intensité de l'accélération jusqu'à la non-convergence du modèle numérique (Sadholz, et al., 2016), (Viskovic, 2015), (Mendes, et al., 2015).

La force sismique latérale suit une distribution linéaire le long de la hauteur du bâtiment depuis les fondations jusqu'au niveau supérieur en respectant les axes X et Y.

Nous proposons la Fig 5.2.9 pour expliquer plus clairement la répartition de la force sismique dans différentes configurations structurales, à savoir : (1) le système poteau poutre avec des planchers rigides, (2) système de murs porteurs sans les planchers rigides (modèle a), (3) système de murs porteurs avec des planchers rigides (modèle b). Les modèles (a) et (b) sont illustrés dans la Section 5.3.2.

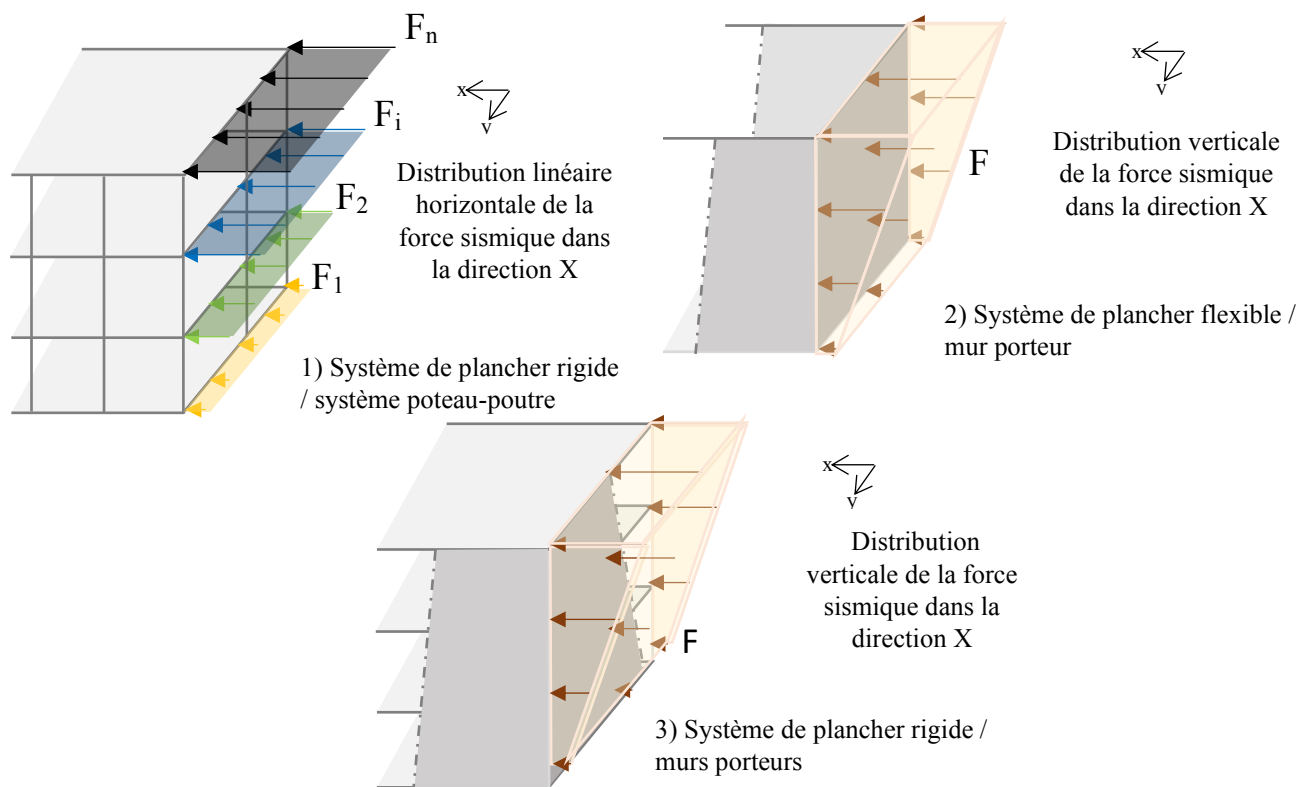


Fig 5.2.9 Répartition des forces sismiques en fonction de la rigidité du plancher (Source : auteur)

La force sismique (F_i) dans le modèle (1) qui augmente en intensité proportionnellement à la hauteur du bâtiment, est calculée et appliquée linéairement à chaque étage (i). Dans le modèle (2), la force sismique générale (F) est appliquée en X ou Y sur l'ensemble du bâtiment avec une distribution croissante à partir des fondations. Dans le modèle (3), la force sismique (F) est

appliquée en respectant le même schéma de distribution que le modèle (2) en incluant les murs porteurs ainsi que les planchers.

5.2.2.3 Planchers

Les planchers porteurs jouent un rôle très important dans la stabilité structurelle du bâtiment à un état statique ou sismique.

A l'état statique, les planchers permettent tout d'abord de supporter les charges verticales mais aussi de les transmettre aux éléments porteurs verticaux (pilier, colonne, murs...).

A l'état sismique et si les planchers sont rigides, ils peuvent être considérés comme un diaphragme horizontal permettant de réduire la force sismique et agissant comme un élément de contreventement en collaboration avec le système de contreventement existant.

La rigidité du diaphragme peut affecter considérablement la réponse sismique globale du bâtiment (Clementi, et al., 2016).

Cependant, il y existe deux considérations distinctes relatives à la modélisation des planchers à prendre en compte lors de l'AP, à savoir :

1. Planchers flexibles : lorsque le transfert des charges des murs endommagés vers des éléments structurels encore efficaces n'est pas assuré. Une connexion rigide et efficace entre les planchers et le mur porteur est faible ou inexistante.
2. Planchers rigides : lorsque le transfert des charges entre les différents éléments structurels est assuré. Les planchers et le mur porteur sont reliés et assemblés efficacement grâce à une liaison rigide entre eux.

Généralement, les planchers ne sont pas inclus dans le modèle 3D des structures de maçonnerie historiques en raison de leur rigidité insuffisante ainsi que le manque de connexion avec les éléments structurels verticaux. Ainsi, seuls les murs porteurs sont considérés.

Cette configuration est recommandée par les codes italiens (O.P.C.M 3274, 2003) (O.P.C.M 3431, 2005) (DM, 1996) (DM, 2005) pour la PA. Par conséquent, les charges verticales et sismiques sont appliquées directement sur les murs porteurs avec une distribution de charges linéaire et triangulaire comme expliqué dans la (Section 5.2.3.2.3) (Mallardo, et al., 2008).

5.2.4 Méthodologie

Afin de résumer toutes les informations et concepts théoriques relatifs à l'AP et de rendre son application plus aisée et accessible, nous proposons l'organigramme synthétique suivant (Fig 5.2.10).

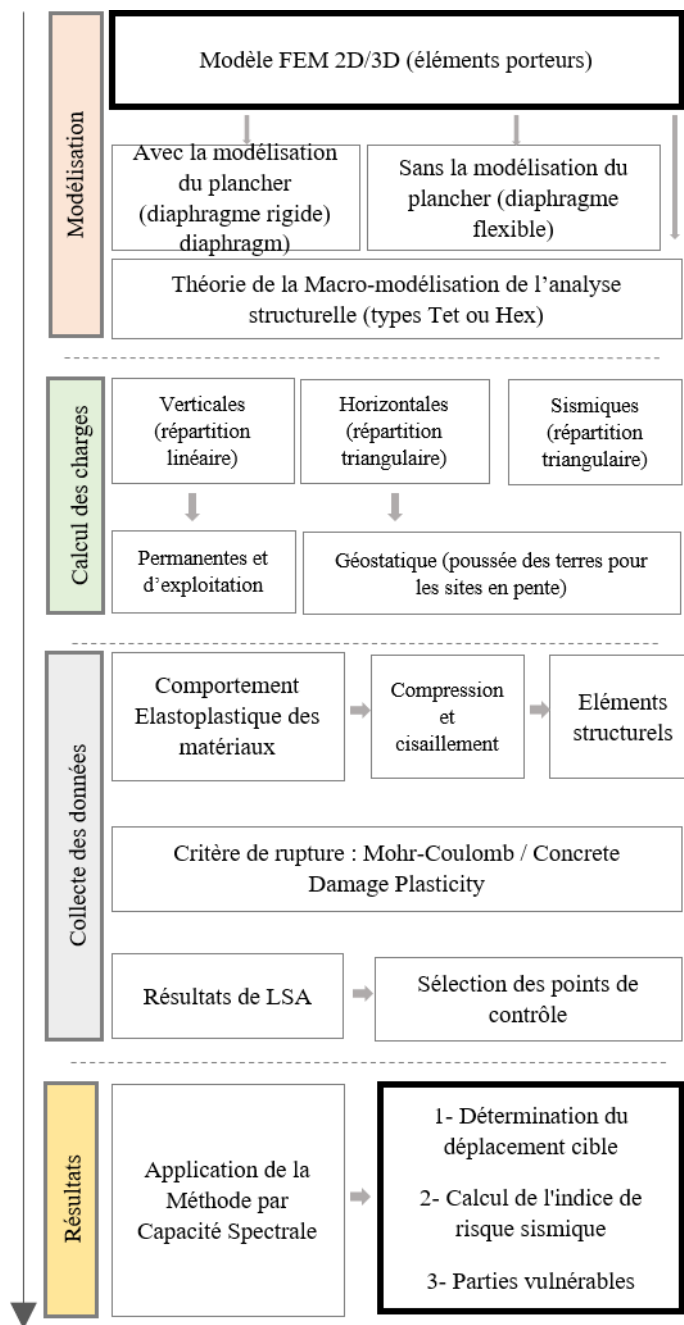


Fig 5.2.10 Méthodologie de la PA (Source : auteur)

5.3 Analyse Modale et Analyse Linéaire Pushover (LPA)

5.3.1 Introduction

Nous proposons dans cette section l'application de l'analyse modale et linéaire Pushover sur l'agrégat. Le règlement parasismique algérien RPA ne prend pas en considération les spécificités des bâtiments historiques ainsi que le processus de la PA. Afin de réaliser ce type d'analyse, nous nous basons sur les réglementations et normes de construction étrangères, à savoir : Eurocode 2008 (Europe) et Construction Technical Norm NTC 2008 (Italie). Les deux analyses réalisées dans cette partie, à savoir l'analyse PA linéaire et l'analyse modale, constituent une première étape avant l'application de l'analyse PA non linéaire. Cette étape nous a permis de vérifier et de confirmer la correspondance entre les formes de déformation générées par l'analyse modale et PA linéaire. De plus, des observations préliminaires pourraient être faites sur le comportement structural de l'agrégat sous l'effet de la force sismique.

5.3.2 Modèle structurel

Les analyses modales, linéaires et non linéaires PA sont effectuées sur l'agrégat en se basant sur le modèle HBIM et en choisissant des éléments solides 3D. Deux modèles sont créés qui sont présentés dans la **Fig 5.3.1**: (1) le modèle (a) comprend uniquement les murs porteurs, les colonnes et les éléments en bois de chaînage. Les planchers sont donc considérés comme des diaphragmes flexibles en supposant l'absence de connexions entre les solives de *Thuja* composant le plancher et les murs porteur en maçonnerie. L'aspect flexible du bois *Thuja* attribue au plancher un certain degré de fléchissement qui peut être visuellement détectable. (2) Le modèle (b) comprend les solives de *Thuja*. Les planchers sont considérés comme des diaphragmes rigides compte tenu de l'encastrement des poutrelles de *Thuja* sur toute l'épaisseur du mur porteur comme expliqué dans la **Section 5.2.3.3**.

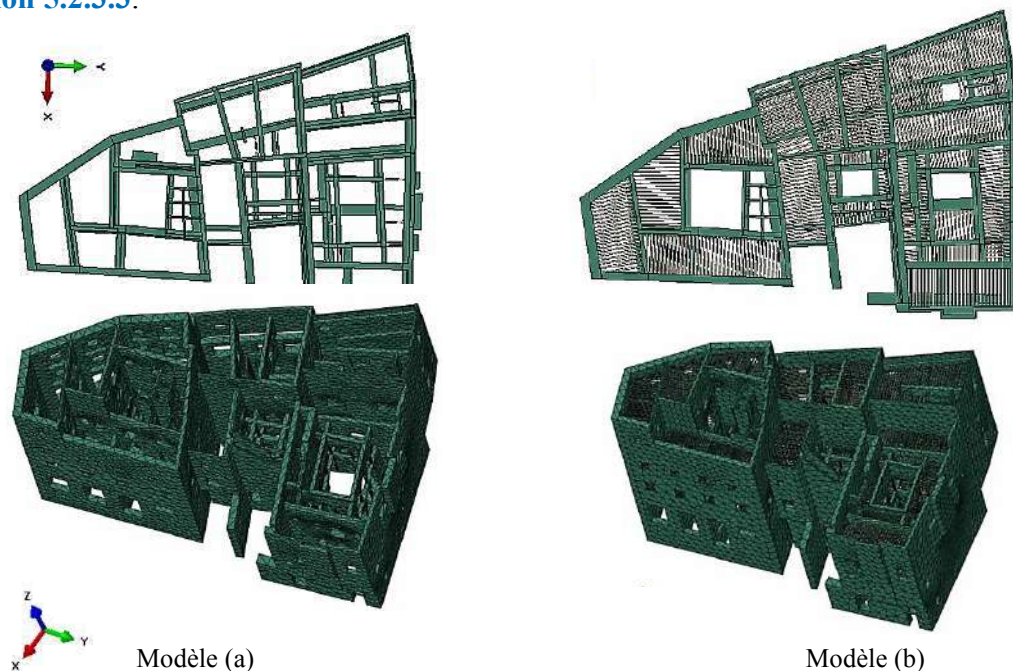


Fig 5.3.1 Modèles par éléments Finis : 1) planchers flexibles (Modèle a) ; 2) planchers rigides (Modèle b)
(Source: auteur).

Les deux modèles permettent de comprendre l'impact de la rigidité du plancher sur le comportement structurel général de l'agrégat.

Les murs de maçonnerie porteurs sont considérés comme homogènes sur la base de la théorie de la macro-modélisation de l'analyse structurale tel qu'il noté dans la [Section 5.2.3.1](#)

5.3.3 Analyse modale : résultats

Les modèles numériques 3D ont été utilisés pour évaluer le comportement modal de l'agrégat et pour calculer les fréquences propres du système. Les formes modales sont calculées avec la méthode *Block-Lanczos*.

L'analyse modale est effectuée pour les 10 premiers modes de vibration qui impliquent généralement les masses et fréquences efficaces les plus importantes. Cette analyse permet : (1) de localiser dans un premier temps les parties les plus vulnérables de la structure lors de l'événement sismique, et (2) de comprendre le comportement typique de l'agrégat. De plus, les formes de déformation obtenues à partir du premier mode vibrationnel sont comparées à celles de l'analyse Pushover linéaire afin de confirmer la correspondance comme expliqué dans la [Section 5.2.2.2](#). Les résultats de l'analyse modale sont résumés dans le [Tab. 5.3.1](#) et [Tab 5.3.2](#), les formes de déformation des 10 premiers modes sont présentées dans la [Fig 5.3.2](#).

Modèle (a)		Direction (Dir)	Fréquence	Période	Masse Effective X- Dir	Masse Effective Y-Dir	Masse Effective X- Dir	Masse Effective Y-Dir
	Mode	/	(Hz)	(s)	(T)	(T)	(%)	(%)
	1	XY	4.413	0.227	320.2	67.0	13.1	1.4
	2	X	5.795	0.173	26.0	1.9	1.1	0.04
	3	XY	5.816	0.172	35.7	185.8	1.5	3.8
	4	Y	6.178	0.162	1.8	806.2	0.1	16.6
	5	X	6.640	0.151	61.2	8.7	2.5	0.2
	6	Y	6.899	0.145	6.4	426.2	0.3	8.7
	7	X	7.038	0.142	81.0	32.3	3.3	0.7
	8	XY	7.560	0.132	6.3	1.1	0.3	0.02
	9	XY	7.860	0.127	338.0	164.7	13.9	3.4
	10	X	8.092	0.124	103.5	14.6	4.3	0.3
	Total						40.2	35.1

Tab 5.3.1 Résultats de l'analyse modale appliquée modèle (a) (Source : auteur)

Modèle (b)		Direction (Dir)	Fréquence	Période	Masse Effective X- Dir	Masse Effective Y-Dir	Masse Effective X- Dir	Masse Effective Y-Dir
	Mode	/	(Hz)	(s)	(T)	(T)	(%)	(%)
	1	XY	4.741	0.211	370.1	21.4	15.1	0.9
	2	Y	6.352	0.157	10.3	565.1	0.4	23.1
	3	XY	7.106	0.141	137.5	102.1	5.6	4.2
	4	XY	7.590	0.132	253.9	3.0	10.4	0.1
	5	XY	8.097	0.123	126.1	388.5	5.2	15.9
	6	Y	8.308	0.120	64.0	25.0	2.6	1.0
	7	X	8.663	0.115	119.6	25.1	4.9	1.0
	8	XY	9.610	0.104	0.3	0.3	0.01	0.01
	9	X	9.845	0.102	7.5	0.1	0.3	0.002
	10	X	9.982	0.100	18.4	6.8	0.8	0.3
	Total						45.3	46.5

Tab 5.3.2 Résultats de l'analyse modale appliquée modèle (b) (Source : auteur)

Pour le modèle (a), 40% et 35% de la masse totale selon les directions respectives X et Y sont obtenus en utilisant les 10 premiers modes (**Fig 5.3.3**). La répartition des formes modales montre clairement que l'agrégat présente des déformations significatives hors-plan des façades. En particulier, la 1^{ère} (13,1%) et la 9^{ème} (13,9%) forme modale du modèle (a) montrent que les charges sismiques agissant selon la direction transversale (axe X) de l'agrégat impliquent des déformations hors-plan remarquables des éléments structuraux orthogonaux. Dans la direction longitudinale (axe Y), les principales déformations importantes sont enregistrées dans le mode 2 (23,1%) et 5 (15,9%). On peut également noter que les déformations répétitives les plus importantes se trouvent dans les plus grandes maisons de l'agrégat qui sont situées aux angles à savoir : les maisons (4) et (5).

Pour le modèle (b), 45% et 46% de la masse totale selon les directions respectives X et Y sont obtenus en utilisant les 10 premiers modes (**Fig 4.3.4**). Le long de la direction longitudinale (Y) les modes supérieurs impliqués sont le 1^{er} et le 4^{ème} avec une masse totale effective respective de 15,1% et 10,4%. En revanche, le long de la direction transversale (X) le 2^{ème} et 5^{ème} modes sont impliqués avec une masse effective respective de 23,1% et 15,9% (**Fig 4.3.4**).

Les masses participantes augmentent de près de 13% et 32% respectivement dans les directions X et Y des deux modèles précédents, ce qui montre une augmentation de la réponse structurale globale de l'agrégat. En considérant les deux modèles précédents, la première fréquence est la plus importante impliquant la masse effective la plus importante (**Fig 5.3.5**). On peut également noter que les parties vulnérables des agrégats dans les deux modèles ne sont pas systématiquement les mêmes : cela signifie que les parties vulnérables de l'agrégat évoluent avec l'insertion de diaphragmes horizontaux rigides (**Fig 5.3.2**). Cependant, le comportement en forme de boîte de la structure augmente. En observant les fréquences dans (**Fig 5.3.5**), les périodes diminuent en passant du modèle (a) au modèle (b).

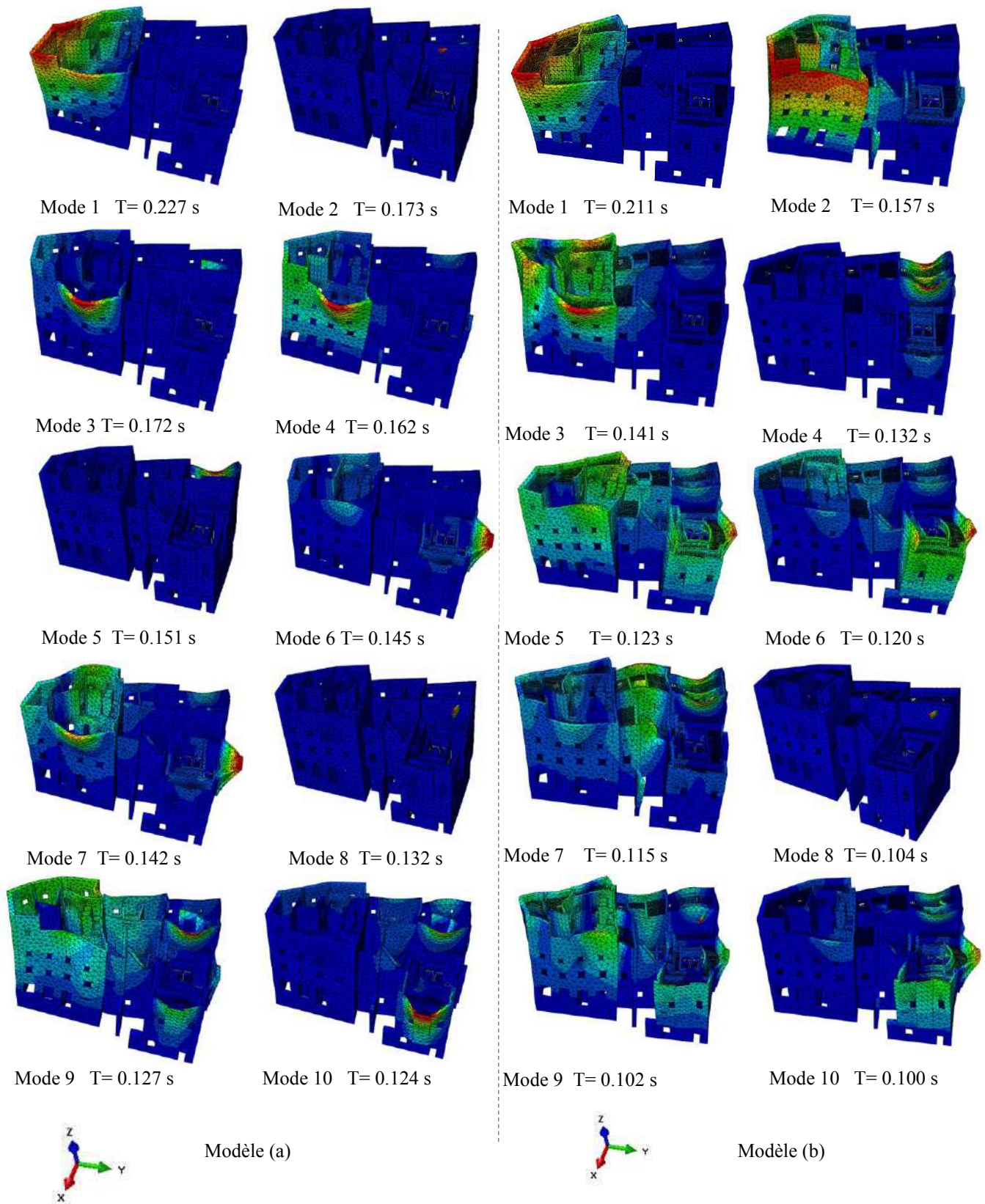


Fig 5.3.2 Déformations obtenues à partir de l'analyse modale pour les deux modèles (Source : auteur)

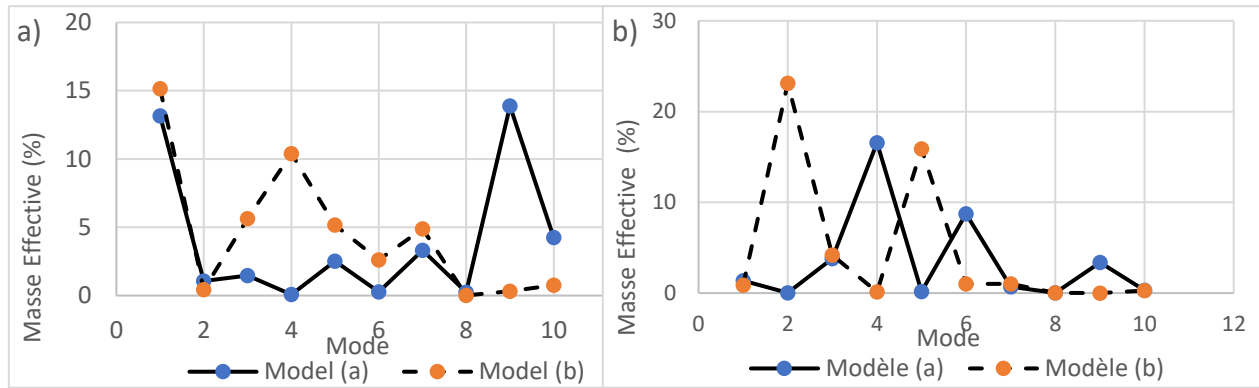


Fig 5.3.3 Masse effective obtenue à partir de l'analyse modale (Source : auteur)

a) direction X, b) direction Y

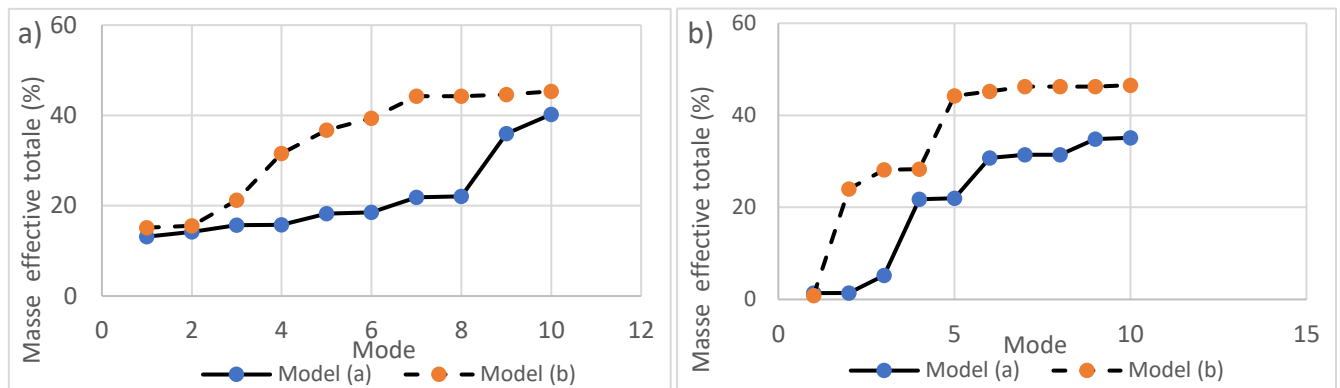


Fig 5.3.4 Masse effective totale obtenue à partir de l'analyse modale (Source : auteur)

a) direction X, b) direction Y

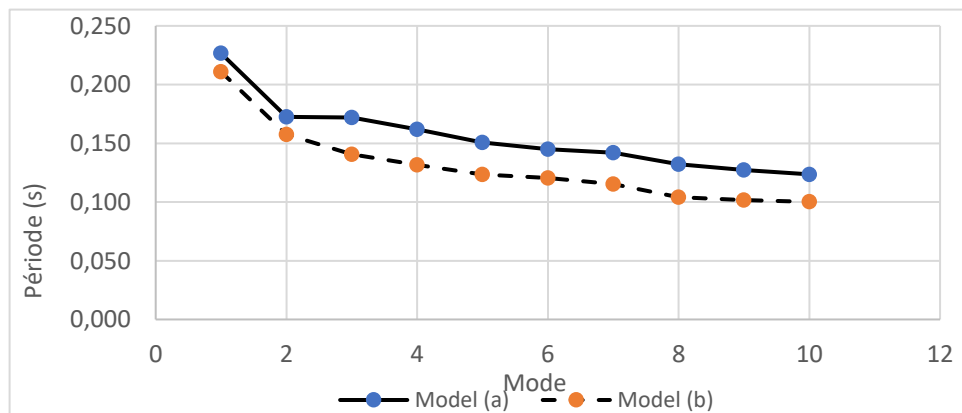


Fig 5.3.5 Distribution des périodes à partir de l'analyse modale (Source : auteur)

5.3.4 Analyse Pushover linéaire

5.3.4.1 Calcul des charges

Pour cette section, nous appliquons le même calcul de charges (charges permanentes et d'exploitation ainsi que les charges géostatiques) utilisé dans l'Analyse Statique Linéaire. Il convient de mentionner que l'analyse modale et PA linéaire représentent une première étape qui précède la PA non linéaire.

5.3.4.2 Charges sismiques

La force sismique (F) appliquée à l'agrégat est générée par l'application d'une accélération horizontale tel que précisé dans la [Section 5.2.3.2.3](#). Le diagramme de répartition de la force sismique est linéaire, dont l'intensité décroît proportionnellement à la hauteur du bâtiment jusqu'à ce qu'elle s'annule au niveau des fondations.

Selon la [Fig 5.3.6](#), la distribution latérale de la force sismique est donnée par la fonction linéaire ([f 5.1](#)) correspondant aux deux modèles (a) et (b).

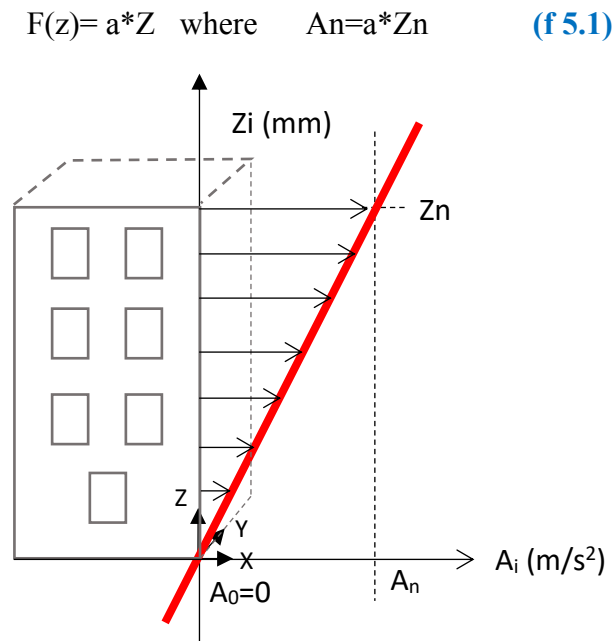


Fig 5.3.6 distribution latérale de la force sismique (Source : auteur).

5.3.4.3 Analyse Linéaire Pushover : résultats

Dans cette section, nous utilisons les mêmes propriétés mécaniques des matériaux de construction employées dans l'Analyse Linéaire Statique ([Tab 5.1.5](#)). Les résultats de l'analyse linéaire Pushover sont présentés pour les deux modèles (a) et (b).

Dans le premier modèle (a), on note une similitude des formes de déformation entre le PA linéaire et l'analyse modale ([Fig 5.3.7](#)). Ce résultat n'est pas hasardeux, car conceptuellement, la PA devrait générer des déformations similaires au premier mode de l'analyse modale impliquant une masse effective importante (13,1%) ainsi que la période la plus élevée (0,221 s).

Les résultats de la PA linéaire selon les deux axes X et Y respectivement montrent un hors-plan des façades les plus importantes de l'agrégat en termes de hauteur et de longueur, c'est un résultat attendu et courant des structures en maçonnerie. Les déformations générées selon l'axe X; même si elles sont insignifiantes dans cette analyse car elles sont développées en phase élastique, elles

sont 13% plus importantes que celles développées suivant l'axe Y. Cependant, certaines observations préliminaires relatives aux parties les plus vulnérables de l'agrégat peuvent être tirées.

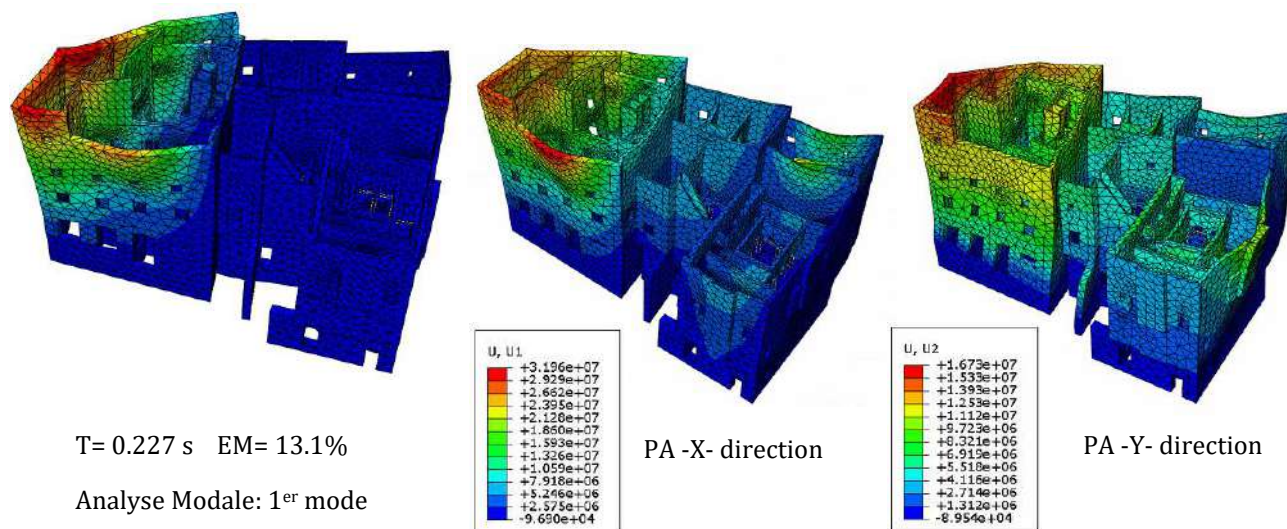


Fig 5.3.7 LPA Vs analyse modale: modèle (a) (Source: auteur)

Dans le second modèle (b) on note également une similitude des formes de déformation entre la PA linéaire et le premier mode de l'analyse modale (**Fig 5.3.8**). La masse effective correspondant au 1^{er} mode est de 15,1% et 0,221s pour la période (T).

Les résultats de la PA linéaire suivant les deux axes X et Y montrent également un hors plan des façades les plus importantes de l'agrégat en termes de hauteur et de longueur. Les déformations générées dans l'axe X sont 36% plus importantes que celles développées dans l'axe Y.

Les déformations générées dans le modèle (b) sont respectivement 20% et 18% moins importantes dans les deux axes X et Y par rapport au modèle (a). Cette observation est attendue car l'insertion de diaphragmes rigides réduit considérablement la vulnérabilité de la structure vis-à-vis des forces sismiques horizontales.

Les deux analyses réalisées dans cette partie, à savoir l'analyse PA linéaire et l'analyse modale, constituent une première étape avant l'application de l'analyse PA non linéaire standardisée. Cette étape nous a permis de confirmer la correspondance entre les formes de déformation générées par les deux analyses. De plus, des observations préliminaires pourraient être faites sur le comportement structural de l'agrégat sous l'effet de l'action sismique. Nous résumons dans la **Fig 5.3.9** les murs les plus vulnérables suivant les deux axes X et Y.

La durée de l'analyse Pushover linéaire varie de 4h pour le modèle (a) à 6h pour le modèle (b) en utilisant 8 processeurs.

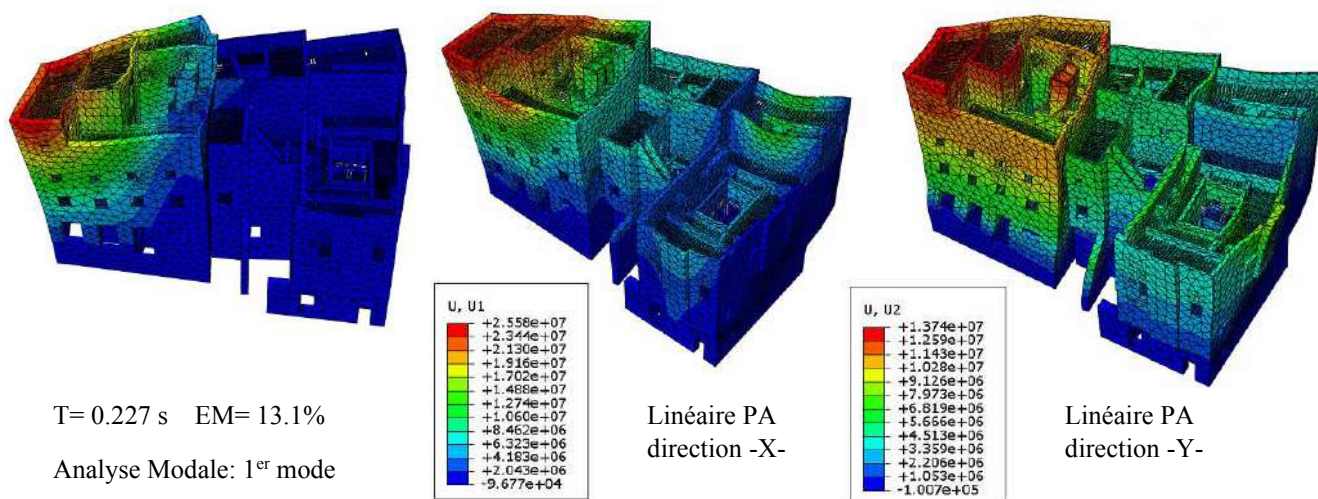


Fig 5.3.8 Analyse modale PA Vs linéaire : modèle (b) (Source : auteur)



Fig 5.3.9 Murs vulnérables le long des axes X et Y (Source : auteur).

5.4 Analyse Pushover Non-linéaire : application

5.4.1 Introduction

Dans cette section, nous proposons l'application de l'analyse Pushover non linéaire sur le cas d'étude suivant la méthodologie proposée dans la **Fig 5.2.10**. Les mêmes modèles présentés dans la **Section 5.3.2** sont utilisés pour la troisième partie de la PA non linéaire. Cette dernière est organisée en deux phases distinctes, à savoir :

- 1- L'analyse structurelle de l'ensemble de l'agrégat pour évaluer son comportement structurel général ainsi que l'interaction entre les différentes unités.
- 2- L'analyse structurelle des unités d'habitation séparées pour comparer leurs performances structurelles à l'état agrégé et désagrégé.

5.4.2 Calcul des charges

5.4.2.1 Charges verticales

Les charges permanentes et d'exploitation calculées lors de l'Analyse Statique Linéaire, sont reprises pour appliquer la PA non-linéaire en modifiant le coefficient de pondération selon le RPA (**RPA, 2003**) tel expliqué dans la **Section 5.2.3.2.1**. Les résultats des charges verticales appliquées à chaque mur porteur sont indiqués dans le **Tab 5.1.4**.

5.4.2.2 Charges géostatiques

Les valeurs de la poussée du sol relatives à chaque mur de soutènement appliquées dans la PA sont obtenues à partir du **Tab 5.4.1**.

Maison	Espace	Surface (m ²)	P _{ULS} (KN/m ²)	Charge (KN)	Charge/2 (KN)	Mur	e	L	S (mm ²)	Nombre étages			Charge murale (N)	Charge (N/mm ²)
										N1	N2	N3		
M1	C1	14.44	11.30	277.25	138.62	A	600	4300	2.5e6	4	0	0	5 e5	0.19
	C2	2.50	11.30	48.00	24.00	B	600	6000	3.6 e6	4	4	0	9.5 e5	0.26
	C3	7.10	11.30	136.32	68.16	C	600	8600	5.1 e6	3	3	3	7.5 e5	0.15
M2	C1	6.42	11.30	123.26	61.63	D	450	8100	3.6 e6	3	3	0	5.7 e5	0.16
	C2	8.15	11.30	156.48	78.24	E	650	5100	3.3 e6	4	4	0	6 e5	0.18
	C3	9.57	11.30	183.74	91.87	F	600	4500	2.7 e6	4	0	0	4.2 e5	0.16
	C4	11.15	11.30	214.08	107.04	G	350	4500	1.5 e6	2	0	0	1.8 e5	0.12
M3	C1	3.40	11.30	65.28	32.64	H	150	1900	2.8 e5	4	4	0	1.2 e5	0.43
	C2	1.92	11.30	36.86	18.43	I	120	1800	2.1 e5	3	0	0	5 e4	0.23
	C3	2.07	11.30	39.74	19.87	J	120	2100	2.5 e5	4	3	0	1.2 e5	0.48
	C4	9.87	11.30	189.50	94.75	K	900	7900	7.1 e6	3	3	0	4 e5	0.06
	C5	2.06	11.30	39.55	19.78	L	350	4100	1.4 e6	2	2	0	3.4 e5	0.24
	C6	1.10	11.30	21.12	10.56	M	450	8100	3.6 e6	1	0	0	1.6 e5	0.05
	C7	1.50	11.30	28.80	14.40	N	300	4400	1.3 e6	2	2	0	2.1 e5	0.17
	C8	2.06	11.30	39.55	19.78	O	550	7400	4.0 e6	2	0	0	2.3 e5	0.06
	C9	2.45	11.30	47.04	23.52	P	300	6700	2.0 e6	2	2	2	1.6 e5	0.06
	C10	12.43	11.30	238.66	119.33	Q	350	3000	1.0 e6	2	0	0	3.9 e4	0.04
	C11	17.16	11.30	329.47	164.74	R	350	2300	8.0 e5	2	0	0	2.1 e4	0.03
M4	C1	15.24	11.30	292.61	146.30	S	550	5300	2.9 e6	3	2	0	3.6 e5	0.13
	C2	4.65	11.30	89.28	44.64	T	350	3700	1.2 e6	2	0	0	5.7 e4	0.04
	C3	14.8	11.30	284.16	142.08	U	350	2300	8.0 e5	2	0	0	3.9 e4	0.05
	C4	12.66	11.30	243.07	121.54	U'	550	3700	2.0 e6	1	0	0	1.4 e4	0.01
	C5	3.67	11.30	70.46	35.23	U''	150	3700	5.5 e5	1	0	0	6.1 e4	0.11
	C6	2.42	11.30	46.46	23.23	V	500	7300	4.3 e6	3	0	0	4.1 e5	0.11
	C7	3.00	11.30	57.60	28.80	W	600	7300	4.3 e6	3	3	3	6.9 e5	0.16
	C8	5.60	11.30	107.52	53.76	X	650	7200	4.6 e6	2	3	0	5.7 e5	0.12
M5	C1	11.17	11.30	214.46	107.23	Y	850	7000	5.9 e6	3	2	0	5.1 e5	0.09
	C2	11.76	11.30	225.79	112.90	Z	600	6600	3.9 e6	4	2	0	2.2 e5	0.06
	C3	13.06	11.30	250.75	125.38	A'	300	3200	9.6 e5	2	0	0	7 e4	0.07
	C4	6.48	11.30	124.42	62.21	B'	300	4100	1.2 e6	2	0	0	4.6 e4	0.04
	C5	13.48	11.30	258.82	129.41	C'	700	3500	2.4 e6	1	0	0	5.4 e4	0.02
	C6	1.86	11.30	35.71	17.86	D'	550	5400	2.9 e6	3	0	0	3.6 e5	0.12
	C7	1.73	11.30	33.22	16.61	E'	700	7000	4.9 e6	3	0	0	3.6 e5	0.07
	C8	1.74	11.30	33.41	16.70	F'	300	3200	9.6 e5	3	1	0	1.4 e5	0.15
	C9	1.45	11.30	27.84	13.92	G'	300	6400	1.9 e6	3	3	0	5.1 e5	0.27
	C10	12.50	11.30	240.00	120.00	H'	900	9600	8.6 e6	4	2	2	5 e5	0.06
						I'	700	6200	4.3 e6	3	0	0	4.3 e5	0.1
						J'	600	5000	3.0 e6	1	0	0	1.2 e5	0.04
						K'	350	5400	1.8 e6	4	0	0	4.5 e5	0.25

Tab 5.4.1 Calcul des charges appliquées aux murs porteurs : analyse PA (Source: auteur)

5.4.2.3 Calcul des charges sismiques

5.4.2.3.1 Considérations

5.4.2.3.1.1 Coefficient d'accélération (A)

Il correspond à la zone sismique et au groupe d'utilisation du bâtiment.

La Casbah d'Alger correspond au Groupe (1A): «bâtiment public, culturel ou historique d'importance nationale» (RPA, 2003), et située dans la zone (III). Selon le RPA, le coefficient d'accélération est égal à 0,4.

5.4.2.3.1.2 Classification du type de sol

La Casbah d'Alger tel que noté dans la Section 5.1.3.2 est située sur un site rocheux suffisamment stable. Cependant, il est classé selon le RPA dans la catégorie « site rocheux » (S1) (type de sol (A) selon l'Eurocode 8): « roche ou autre formation géologique caractérisée par une vitesse moyenne des ondes de cisaillement (V_s) 800m / s » (RPA, 2003).

5.4.2.3.1.3 Classification du cas d'étude

Selon le RPA et l'Eurocode 8, « les bâtiments sont classés en 4 classes d'importance, en fonction des conséquences de l'effondrement pour la vie humaine, de leur importance pour la sécurité publique et la protection civile dans la période post-séisme immédiate, et sur le plan social et économique » (EN 1998-1, 2004).

La Casbah d'Alger correspond au Groupe (1A): «bâtiment public, culturel ou historique d'importance nationale» (RPA, 2003) (nomenclature de classe (IV) selon l'Eurocode 8), dont le facteur de construction d'importance selon l'Eurocode 8 est égal à :

$$\gamma_1 = 1.4$$

5.4.2.3.2 Charges sismiques horizontales

Afin de déterminer la force sismique (accélération) appliquée à l'agrégat dans les quatre directions (-X, + X, -Y, + Y) jusqu'à atteindre la non-convergence du modèle numérique, le modèle (a) représentant le cas le plus défavorable est pris comme référence. Les mêmes valeurs sont appliquées au modèle (b) pour rendre la comparaison possible. Les valeurs sont résumées dans le Tab 5.4.2.

	Direction			
	+X	-X	+Y	-Y
Accélération initiale (m/s ²)			1	
Accélération finale (m/s ²)	4.15	3.2	8	4.8

Tab 5.4.2 PA non-linéaire : accélération sismique appliquée à l'agrégat (modèle (a) et (b)) (Source: auteur)

5.4.3 Propriétés des matériaux de construction

La PA non linéaire est réalisée en insérant le comportement élasto-plastique (non linéaire) des matériaux de construction conformément aux explications présentées dans la [Section 5.2.3.1](#).

Les propriétés mécaniques des murs de maçonnerie n'ont pas pu être obtenues dans le laboratoire technique en raison de l'indisponibilité des échantillons adéquats (quantité et dimensions de fragments de mur exigées). Nous nous sommes concentrés uniquement sur les tests mécaniques relatifs aux briques en terre cuite et au mortier de chaux et d'argile. Selon Sahlin, la résistance de la maçonnerie représente 10 à 40% de la résistance des briques ([Sahlin, 1971](#)).

Nous nous basons sur la circulaire du 21/01/2019 relative à la dernière version de NTC (*Norme Tecniche per le Costruzioni*) pour en déduire les caractéristiques mécaniques des murs en maçonnerie ([NTC, 2019](#)). La circulaire fournit des valeurs indicatives pour les caractéristiques mécaniques des murs de maçonnerie en fonction du type et de la qualité des matériaux de construction. Des coefficients de correction d'augmentation ou de réduction sont également fournis en fonction de la qualité du mortier, de la présence de liaisons transversales dans les murs, etc.

Toutes les propriétés mécaniques du bois de *Thuja* sont tirées du test de laboratoire à l'exception du rapport de Poisson proposé par ([Meier, 2015](#)).

Enfin, les proportions mécaniques du tuf sont extraites de la littérature ([Heap, et al., 2014](#)). Les données relatives aux matériaux de construction des Maisons de la Casbah d'Alger sont affichées dans le [Tab 5.4.3](#).

	Selon NTC			
	Densité	Module de Young E	Rapport de Poisson ν	Résistance à la compression f
Maçonnerie (Brique en terre cuite + mortier de chaux)	t/mm ³	MPa	/	MPa
	4E-9	1200-1800	/	2.6-4.3
	6E-9			
	Mur en maçonnerie avec un mortier de bonne qualité dont ($f > 2$ MPa), un coefficient de correction (K) devrait être utilisé pour tous les paramètres. $K = f^{0.35}$ MPa/ $f = 2$ MPa $K = 1.27$			
	Les paramètres à considérer dans l'analyse structurale après l'application des coefficients de correction			
	2E-9	2450	0.22	5.8
Bois de <i>Thuja</i>	6.80E-10	6840	0.38	37.6
Tuf	1.27E-09	5070	0.28	3.47

Tab 5.4.3 Propriétés mécaniques des matériaux de construction (Source : auteur)

Conformément aux explications fournies dans la [Section 5.2.3.1](#), les données du CDP supposées pour les murs de maçonnerie sont extraites de la littérature et présentées dans le [Tab 5.4.4](#).

Angle de Dilatation	Excentricité	Fb0/fc0	K	Paramètre de Viscosité	Résistance à la traction	Énergie de fracture
(°)					MPa	
10	0.1	1.16	0.667	0.0002	0.4	0.04

Tab 5.4.4 Données du CDP supposées pour les murs de maçonnerie (Source : auteur)

5.4.4 Points de contrôle

Nous nous basons sur les analyses précédemment effectuées (Linéaire Statique, linéaire Pushover et modale) avant de sélectionner un ensemble de points de contrôle qui sont affichés dans la **Fig 5.4.1** tel indiqué dans la (**Section 5.2.2.5**).

Nous avons sélectionné 37 points de contrôle qui ont été définis pour contrôler l'activation possible de mécanismes cinématiques partiels de panneaux ou de groupes individuels. Les CP sont codifiés comme suit: CP x-y où X représente le numéro de maison et Y le numéro du nœud et sont répartis comme suit:

1. Les angles de l'agrégat
2. La partie médiane des façades principales de chaque maison
3. La partie médiane des murs intérieurs les plus sollicités
4. Les parties supérieures des galeries entourant les patios
5. Les parties supérieures des encorbellements.

Les courbes de capacité sont obtenues dans chaque direction d'application de la force sismique en se référant aux points ayant subi des mécanismes de rupture globaux ou locaux.

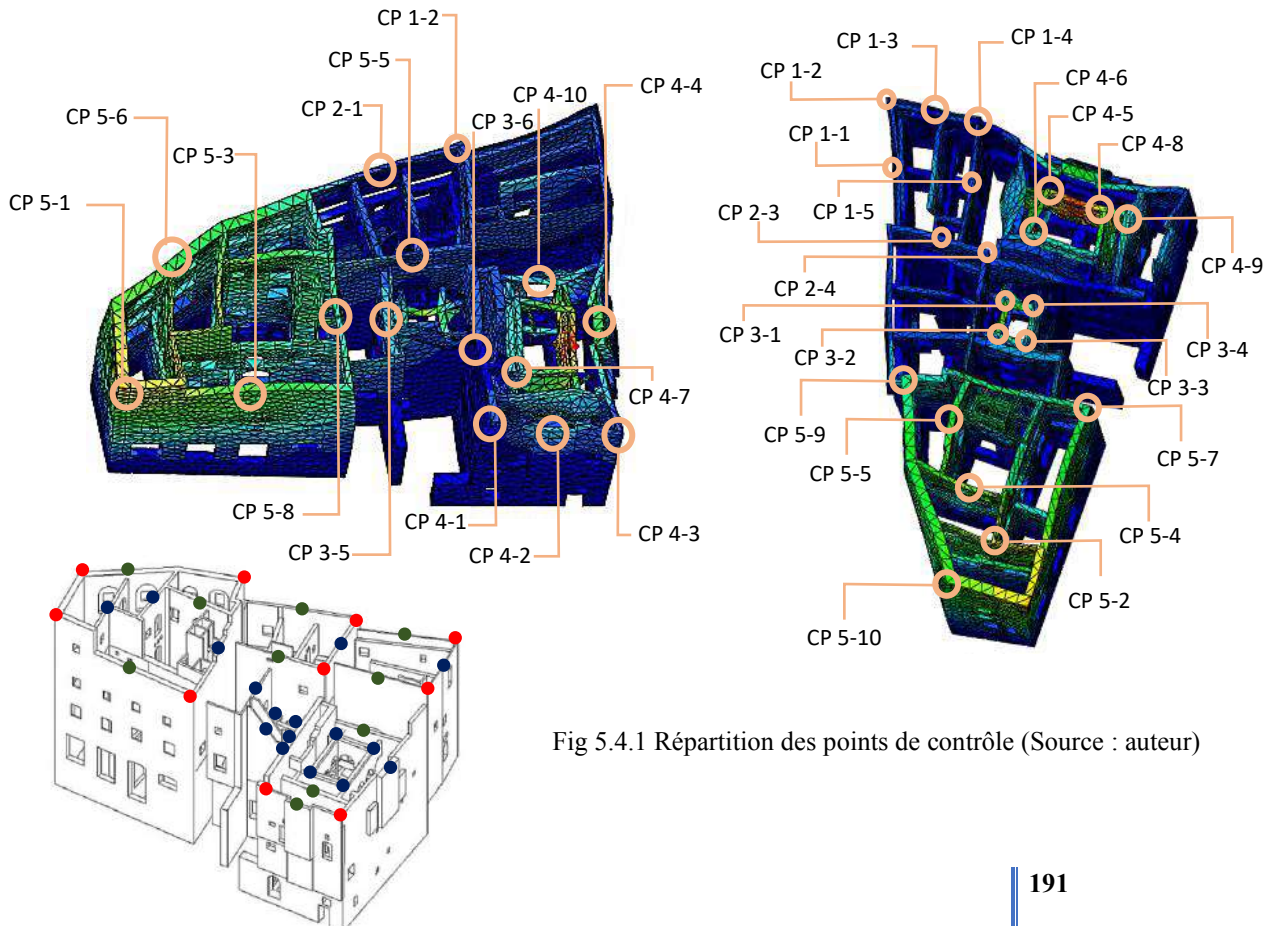


Fig 5.4.1 Répartition des points de contrôle (Source : auteur)

5.4.5 Résultats

5.4.5.1 Comportement général : agrégat complet

Les résultats de l'application de la PA sur l'ensemble de l'agrégat selon les quatre directions sont présentés ci-dessous.

Direction + X

On note des mécanismes de repture locaux correspondant aux points de contrôle CP 5-1 pour les deux modèles (a) et (b) et CP 5-3 pour le modèle (a) (**Fig 5.4.2**) dont les courbes de capacité sont tracées et présentées dans la **Fig 5.4.3**.

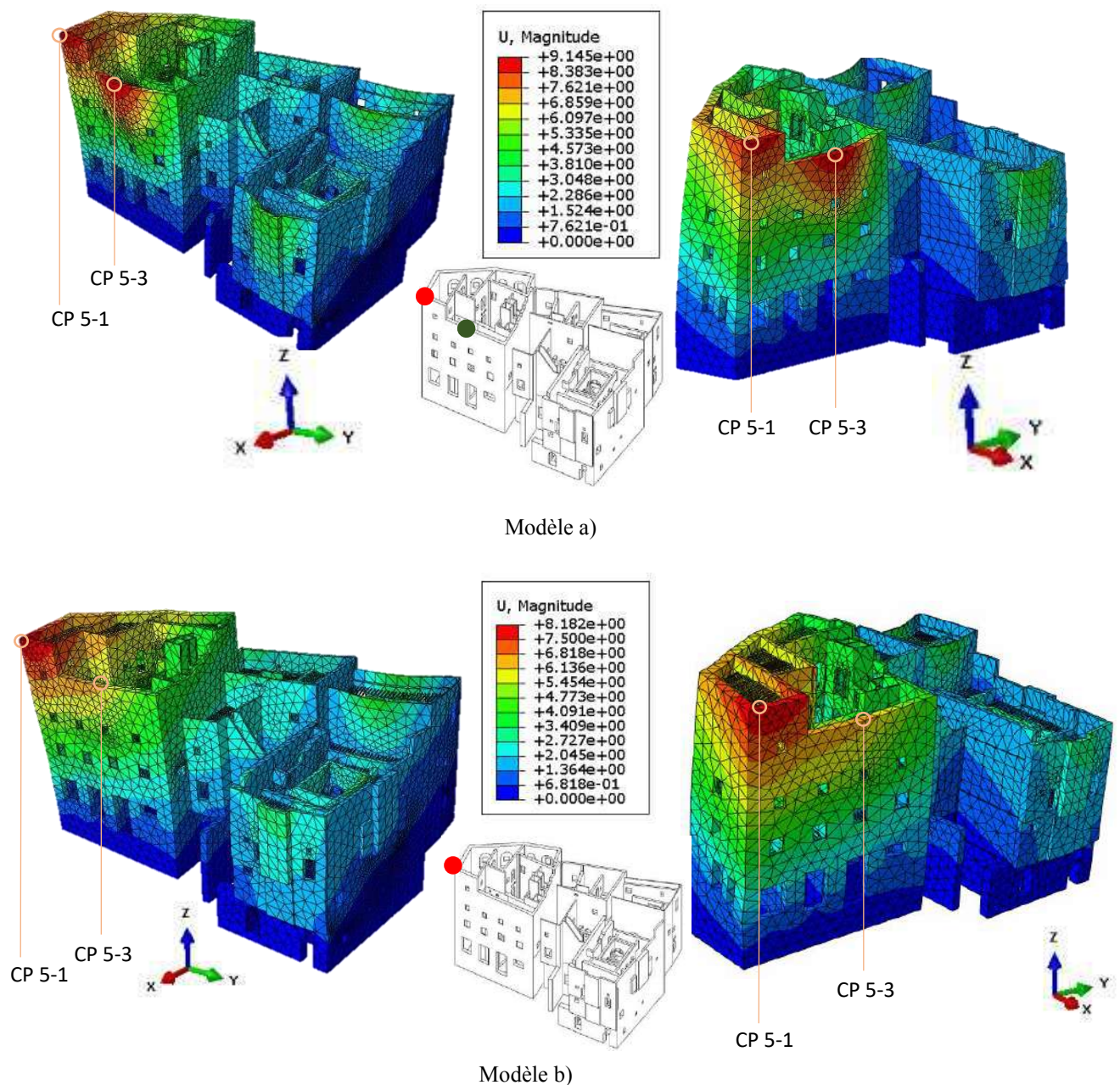
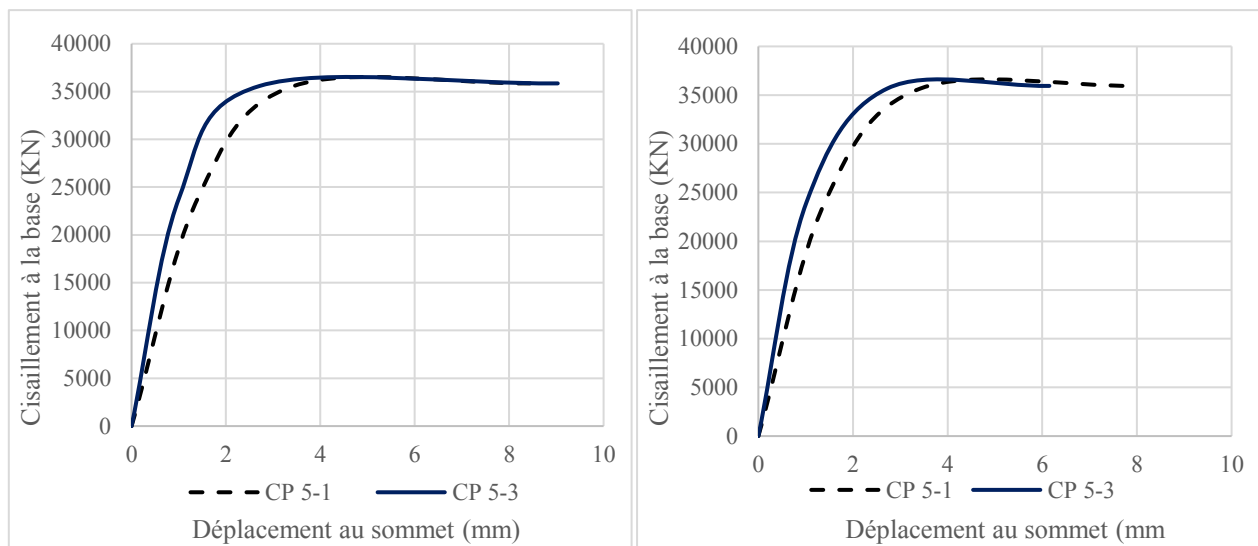


Fig 5.4.2 Résultats de la PA non-linéaire direction +X : application sur l'agrégat (Source : auteur).



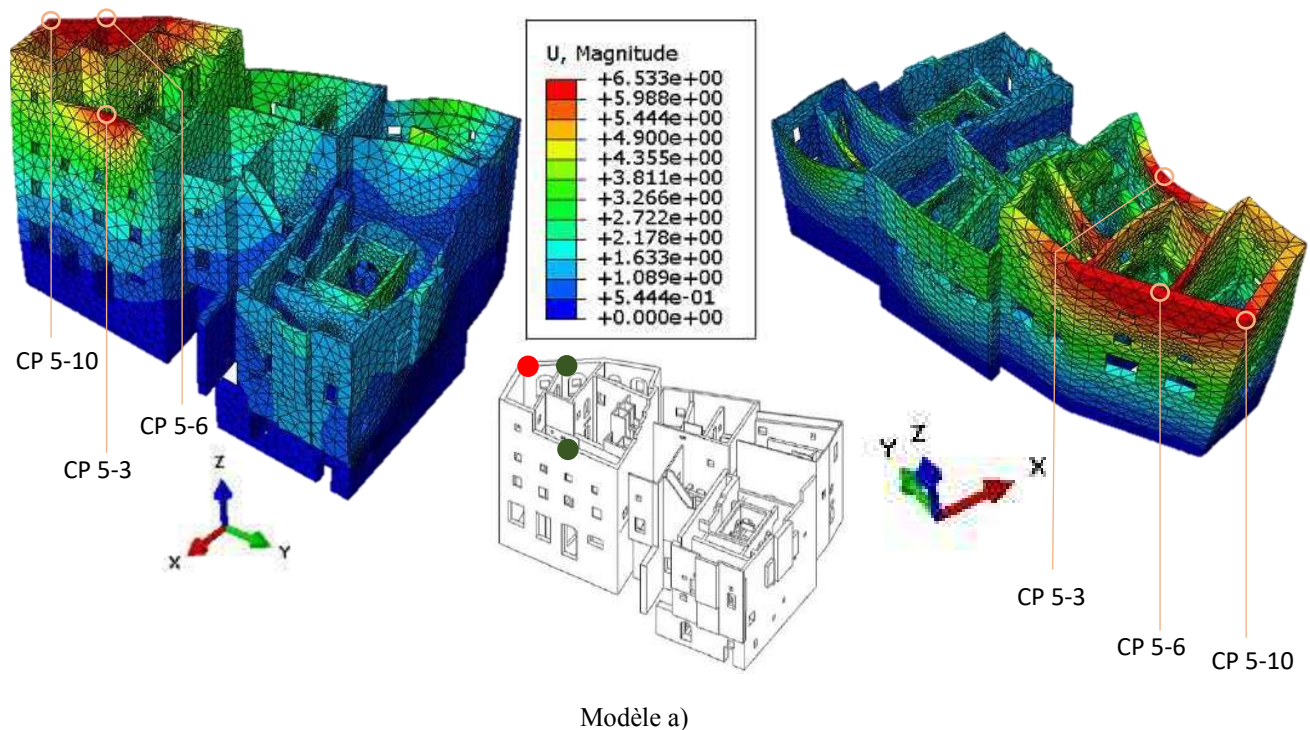
1)

2)

Fig 5.4.3 Courbes de capacité direction +X : application sur l'agrégat (Source : auteur)
1) modèle (a); 2) modèle (b)

Direction -X

On note des mécanismes de repture locaux correspondant aux points de contrôle CP 5-6 et CP 5-10 pour les deux modèles (a) et (b) et CP 5-3 pour le modèle (a) (Fig 5.4.4) dont les courbes de capacité sont tracées et présentées dans la Fig 5.4.5.



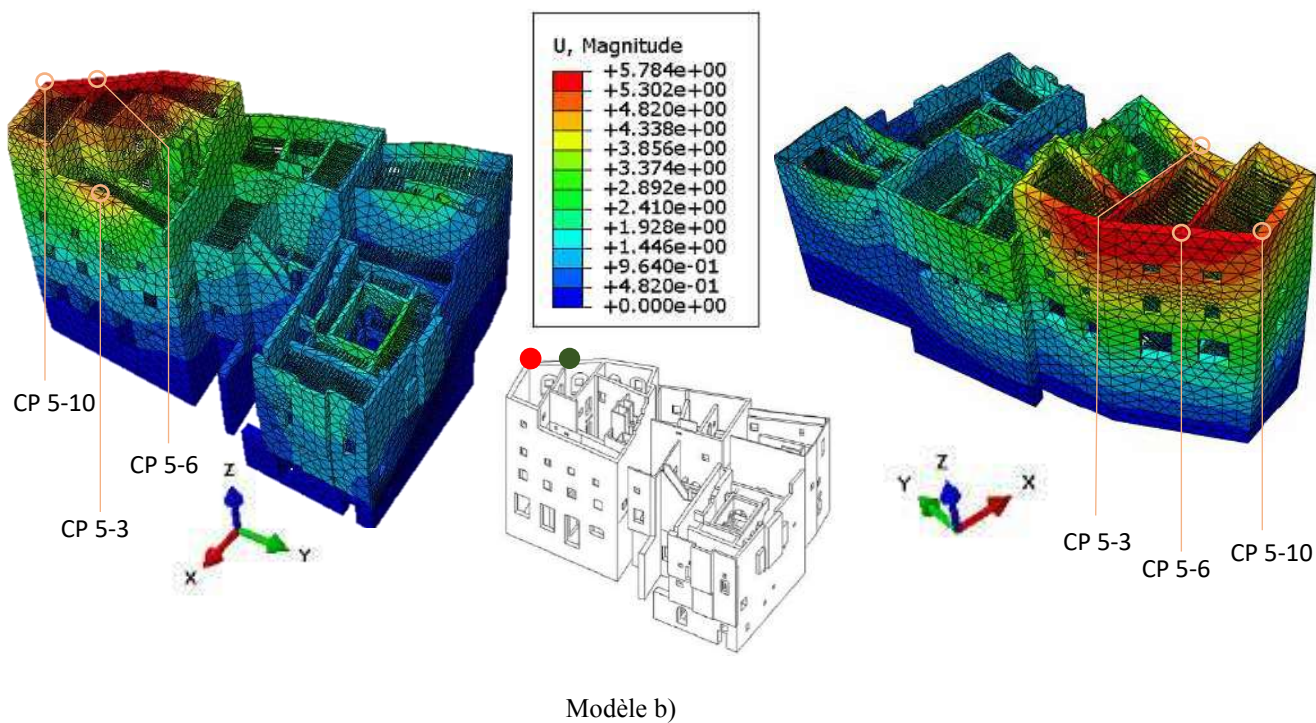


Fig 5.4.4 Résultats de la PA non linéaires direction -X : application sur l'agrégat (Source : auteur).

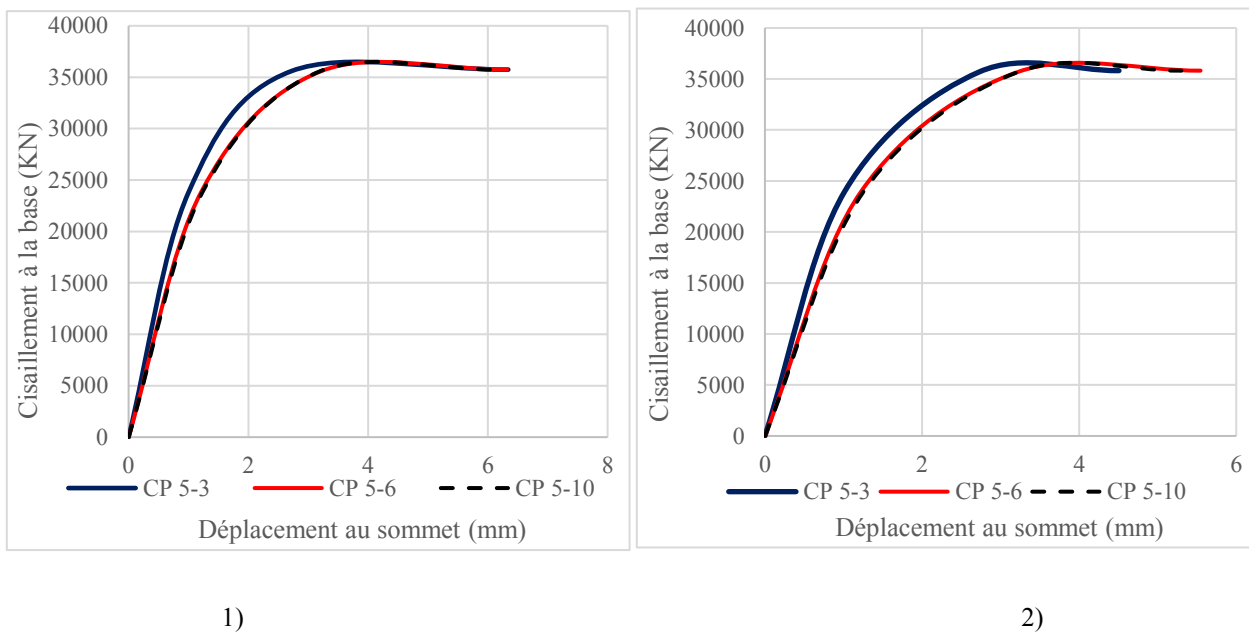


Fig 5.4.5 Courbes de Capacité direction -X : application sur l'agrégat (Source : auteur)

1) modèle (a); 2) modèle (b)

Direction +Y

On note des mécanismes de repture locaux correspondant aux points de contrôle CP 4-4 pour les deux modèles (a) et (b) et CP 5-1 pour le modèle (b) (Fig 5.4.6) dont les courbes de capacité sont tracées et présentées sur la Fig 5.4.7.

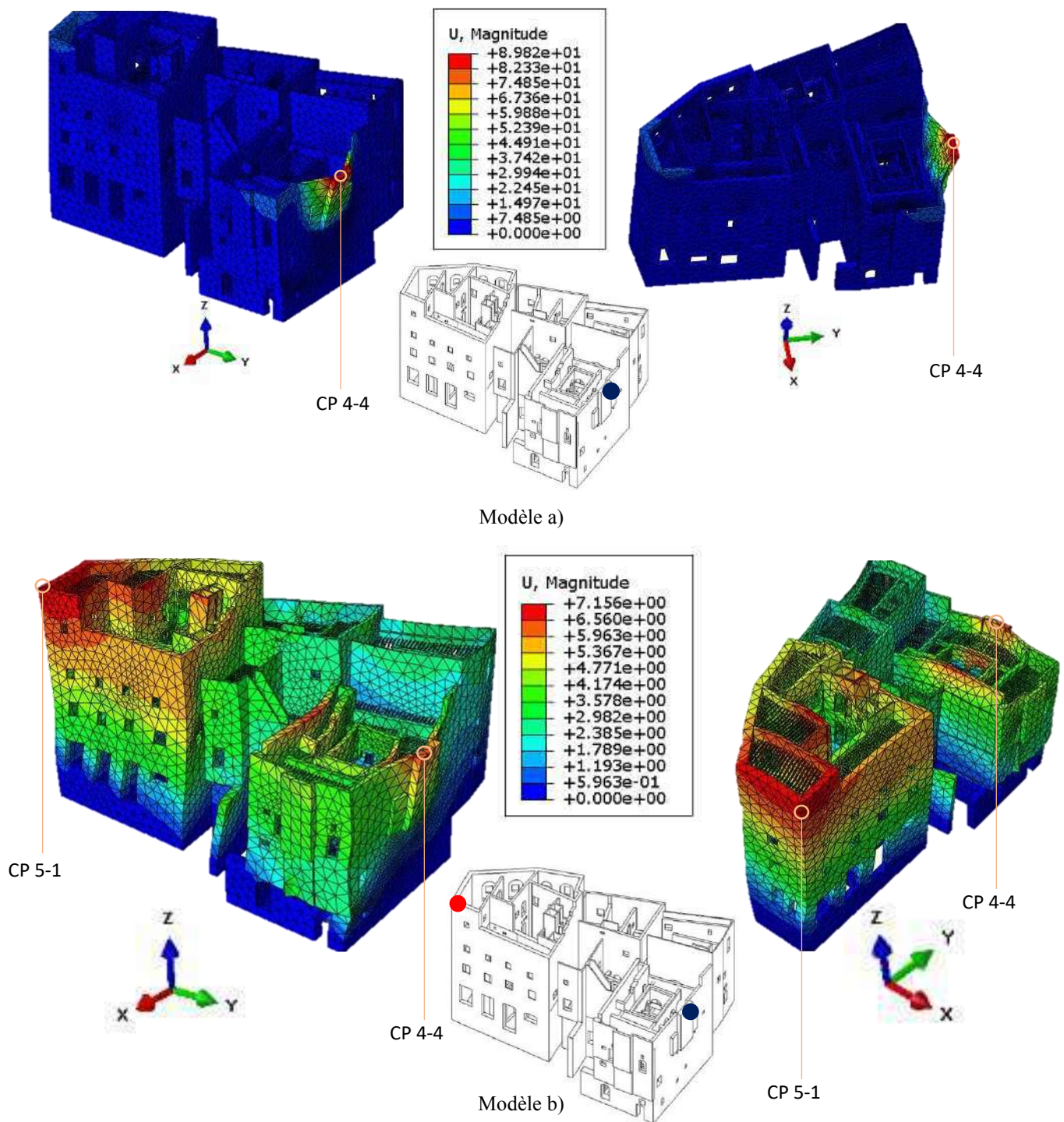


Fig 5.4.6 Résultats de la PA non-linéaire direction +Y: application sur l'agrégat (Source : auteur).

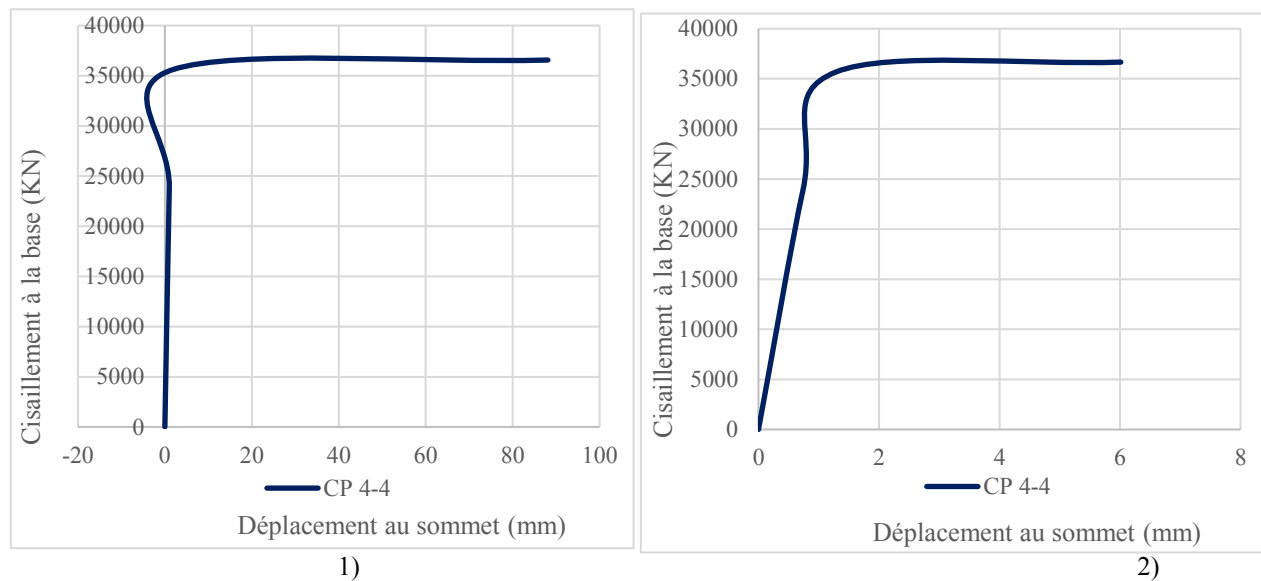
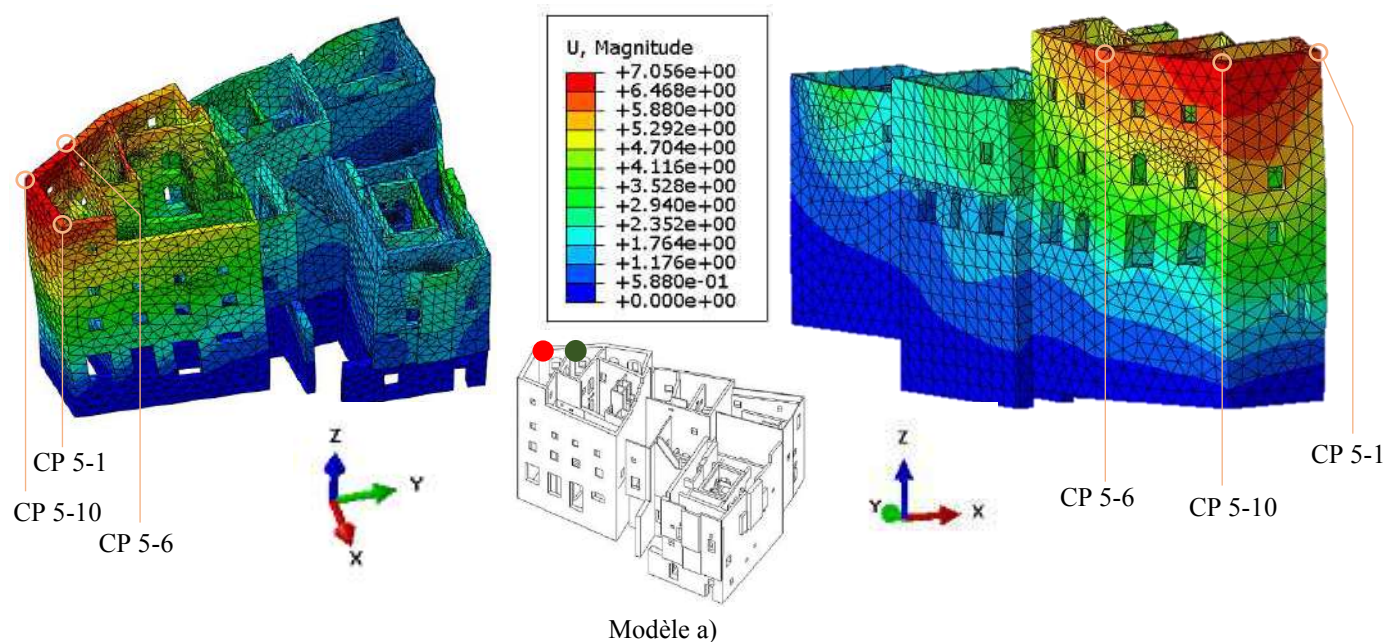


Fig 5.4.7 Courbes de capacité direction +Y : application sur l'agrégat (Source : auteur)

1) modèle (a); 2) modèle (b)

Direction -Y

On note des mécanismes de repture locaux correspondant aux points de contrôle CP 5-6 et CP 5-10 pour les deux modèles (a) et (b) et CP 5-1 pour le modèle (b) (**Fig 5.4.8**) dont les courbes de capacité sont tracées et présentées dans la **Fig 5.4.9**.



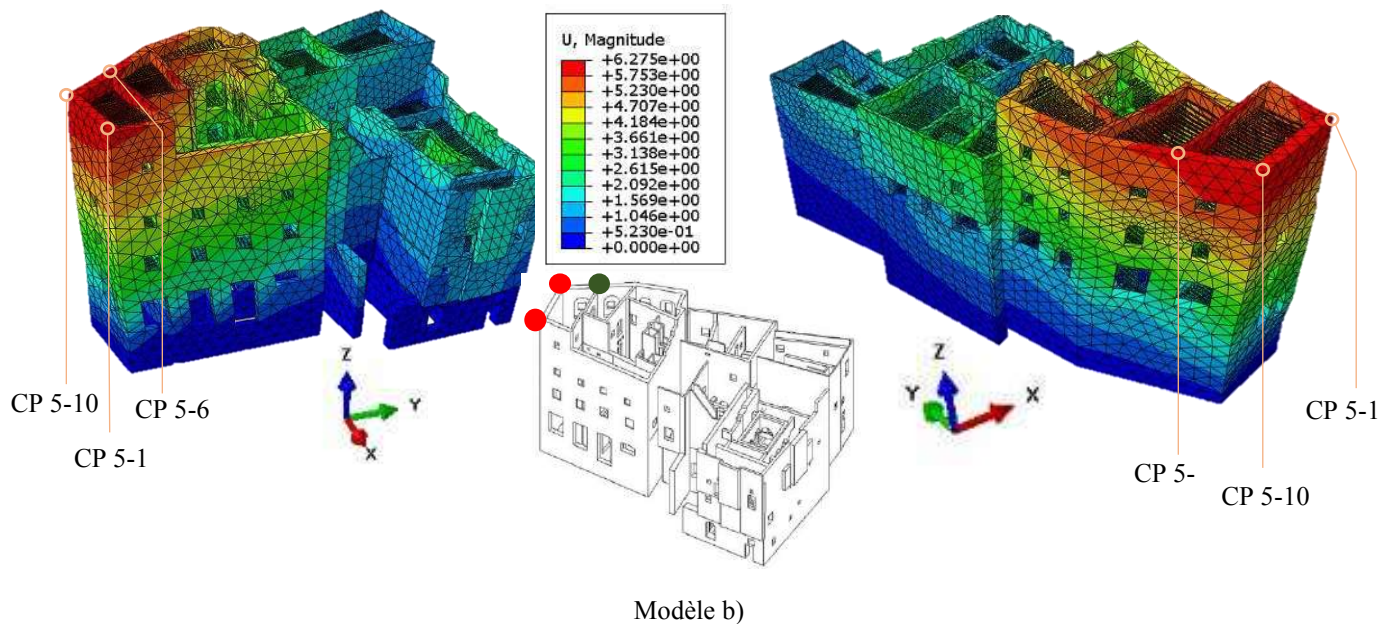


Fig 5.4.8 Résultats de la PA non-linéaire direction -Y: application sur l'agrégat (Source : auteur).

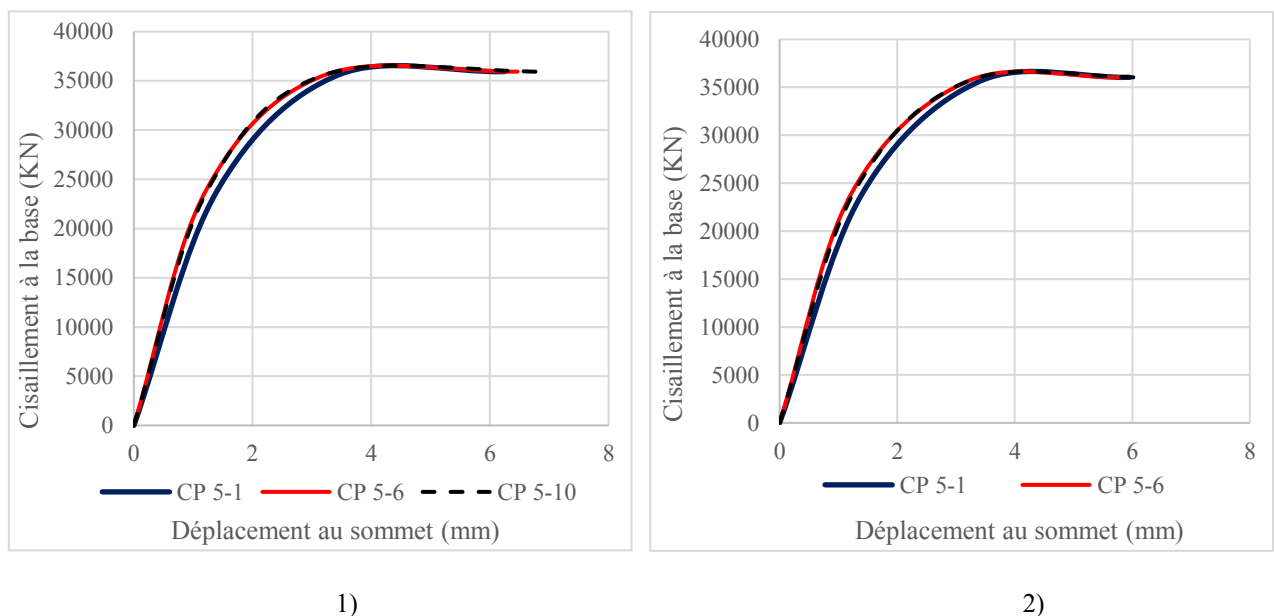
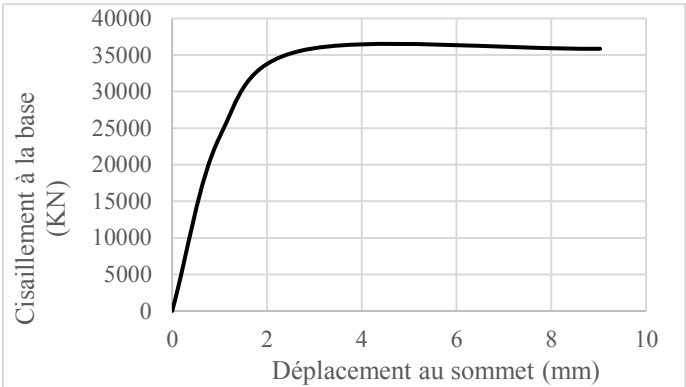
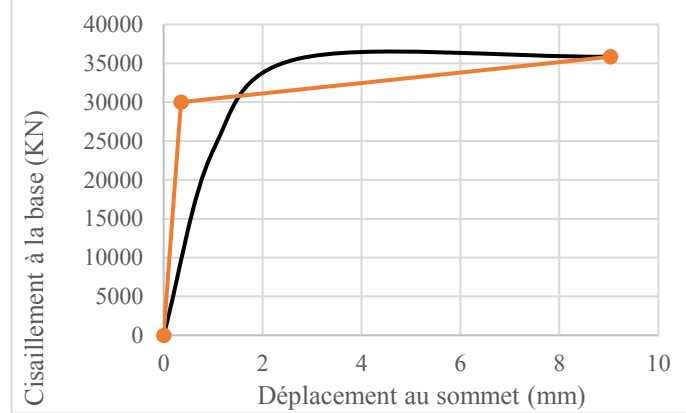
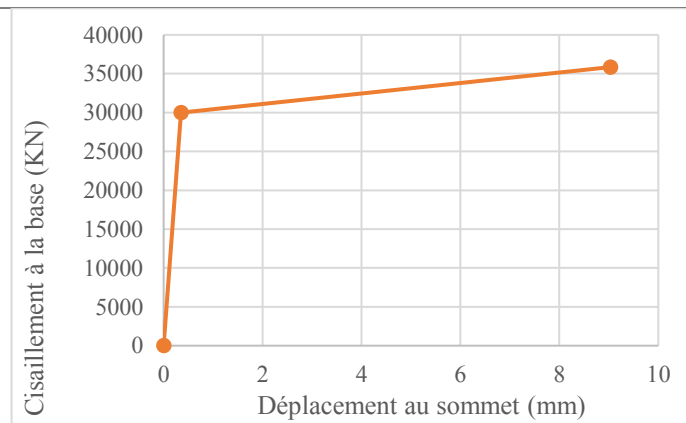
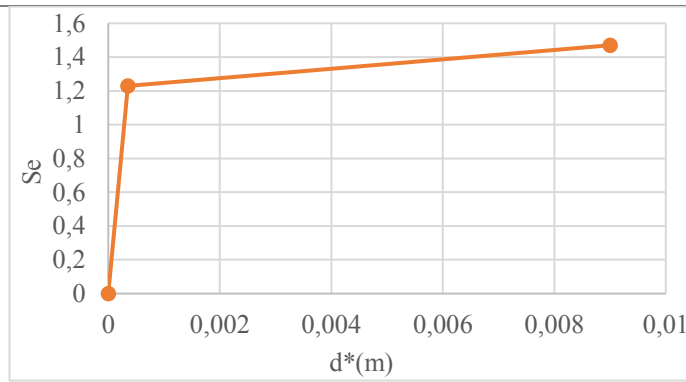


Fig 5.4.9 Courbes de Capacité direction -Y: application sur l'agrégat (Source : auteur)

1) modèle (a); 2) modèle (b)

Selon la méthodologie présentée dans la [Section 5.2.2.3](#), la Méthode par Capacité Spectrale CSM est appliquée aux PC les plus vulnérables dans chaque direction pour le cas le plus défavorable à savoir le modèle (a). Le [Tab 5.4.5](#) résume les étapes de l'application de la CSM au CP 5-3 dans la direction +X pour le modèle (a).

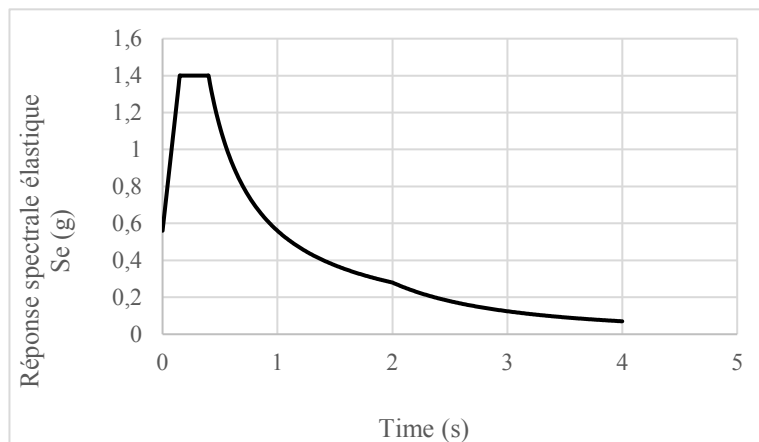
Etape	Modèle (a)
1- Courbe de capacité à partir de la partie la plus endommagée. Modèle (a): CP 5-3	
2- Conversion de la courbe de capacité en courbe bilinéaire	
3- Conversion des courbes du système MDOF en système SDOF considérant: Modèle (a): $m^*=24330.1 \text{ kN}$ $\Gamma = 1$	
4- Courbe de spectre de capacité	

5- Spectre de la réponse élastique considérant:

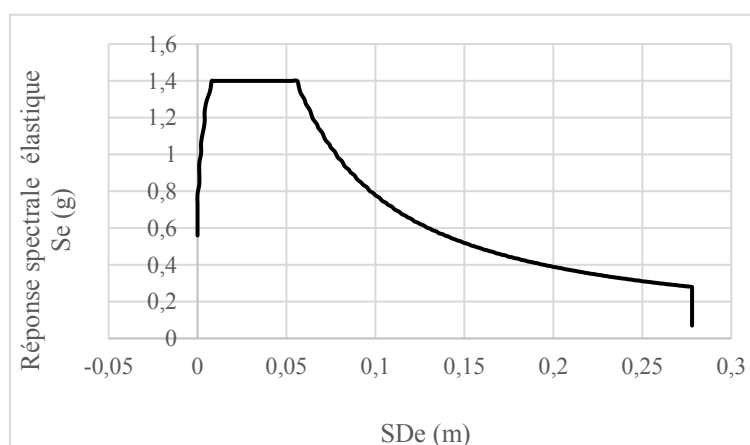
Modèle (a):

$\eta = 5\%$

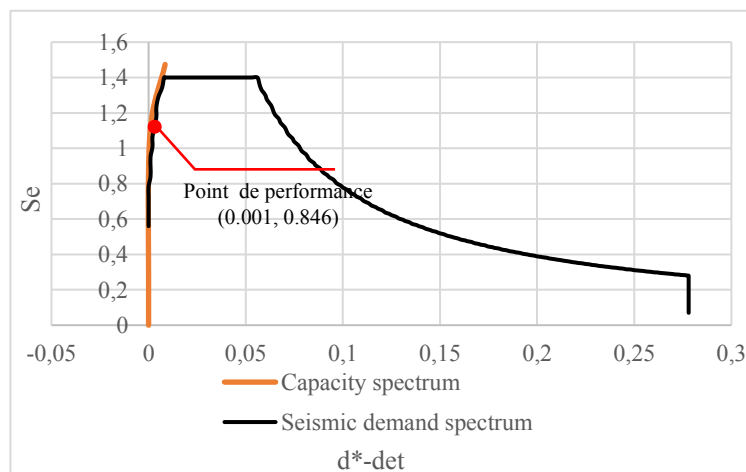
$T^* = 1.48s$



6- Spectre de la demande sismique



7- Application de ADRS (Niveau de performance)



Tab 5.4.5 application étape par étape de la CSM: direction +X (Source : auteur)

La même méthode affichée dans le [Tab 5.4.5](#) est appliquée aux trois autres directions à savoir: (CP 5-3 en -X), (CP 4-4 en + Y) et (CP 5-10 en -Y).

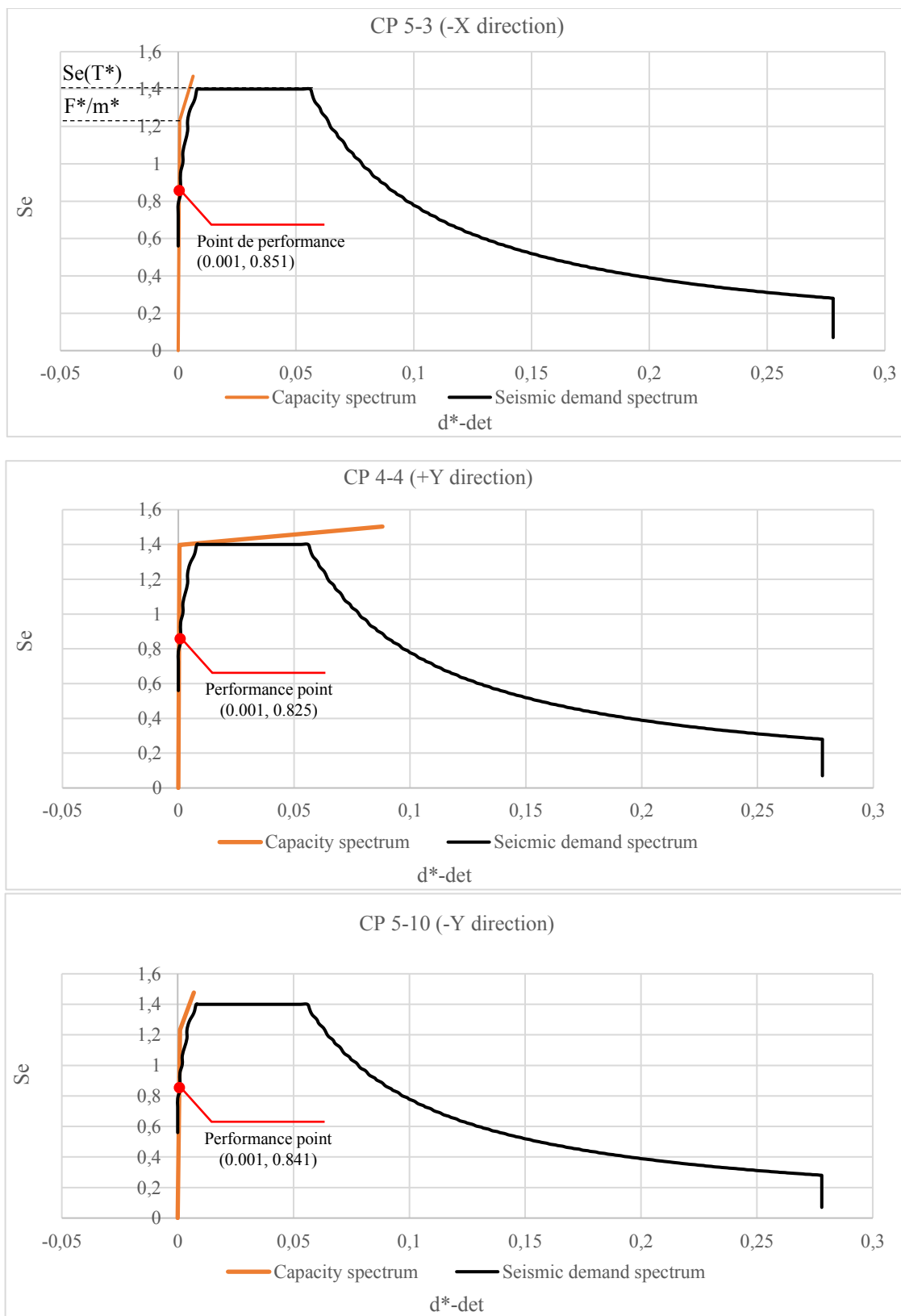


Fig 5.4.10 Application de la CSM application : toutes les directions (Source: auteur)

5.4.5.1.1 Discussion

Dans cette section, nous avons présenté les résultats de l'analyse Pushover appliquée à l'ensemble de l'agrégat en tenant compte de deux cas distincts, à savoir : un premier cas (modèle (a)) dont les planchers sont considérés flexibles sans inclure les poutres porteuses de *Thuja*, et un deuxième cas (modèle (b)) dont les planchers sont considérés rigides en modélisant les poutres porteuses.

Tout d'abord, l'intensité maximale de la force sismique (accélération) appliquée dans la direction de l'axe $\pm Y$ provoquant des mécanismes de repture locaux de l'agrégat est nettement supérieure à celle appliquée dans la direction de l'axe $\pm X$. Ce résultat n'est pas hasardeux si l'on fait attention aux caractéristiques géométriques et dimensionnelles de l'agrégat :

- 1- Ce dernier épouse une forme longitudinale suivant l'axe Y, dont le rapport longueur / largeur est de l'ordre de 1,4 et 5,2 par rapport aux deux extrémités transversales respectives (Fig 2.2.2). Par conséquent, l'inertie des murs développée le long de l'axe Y est plus grande.
- 2- Les plus importants murs porteurs en maçonnerie en termes de dimensions constituent les façades principales qui sont particulièrement développées suivant l'axe Y. Ceci dit, le système de contreventement général de l'agrégat composé principalement de murs porteurs est plus efficace dans la direction Y.

En conséquence, l'agrégat démontre une meilleure réponse structurale vis-à-vis de l'action sismique le long de l'axe Y.

Des mécanismes de repture locaux sont détectés dans toutes les directions qui, en se référant aux mécanismes de défaillance standard des constructions en maçonnerie (Mochi, et al., 2016), (Pasqualon, 2020) et (Beolchini, et al., 2005), peuvent être regroupés en deux catégories, à savoir:

A- Hors plan des façades : flexion horizontale

La flexion horizontale des murs en maçonnerie (les façades en particulier) est l'un des mécanismes locaux de défaillance locaux courants des constructions historiques en maçonnerie. Ce Mécanisme peut en effet être provoqué par différents facteurs tels que : 1) une mauvaise connexion entre la couverture et les murs de maçonnerie, 2) la présence de planchers poussants, 3) la présence d'ouvertures pratiquées dans l'épaisseur de la maçonnerie (niches, conduits de fumée, etc.), 4) maçonnerie mince avec des murs de contreventement perpendiculaires espacés.

Ce mécanisme a été déclenché et noté dans 3 directions aux points de contrôle CP suivants:

Direction + X: le CP 5-3 (Fig 5.4.2 a) avec un déplacement élastique égal à 9 mm correspondant à une force de cisaillement à la base de 3,58 E + 4 kN (Fig 5.4.3).

Direction -X: le CP 5-3 (Fig 5.4.4 a) avec un déplacement élastique égal à 6,3 mm correspondant à une force de cisaillement à la base de 3,57 E + 4 kN (Fig 5.4.5).

Direction +Y: le CP 4-4 (Fig 5.4.6 a) avec un déplacement élastique égal à 88,1 mm correspondant à une force de cisaillement à la base de 3,56 E + 4 kN (Fig 5.4.7).

La diminution de l'épaisseur des murs porteurs aux derniers niveaux, en particulier ceux constituant les façades de l'agrégat (Fig 5.1.2 a), la présence de niches et d'ouvertures ainsi que l'important

espacement entre les deux murs perpendiculaires aux façades, représentent les principales causes de déclenchement de ce type de mécanisme pour l'agrégat en question (**Fig 5.4.11**).

Il est important d'approfondir et de comprendre les principales raisons du déclenchement de ce mécanisme d'effondrement d'un point de vue cinématique. En effet, lorsqu'un mur de façade est bien relié aux murs qui lui sont perpendiculaires, dont la partie supérieure n'est pas retenue par un dispositif structural (toit, plancher, etc.) tel le cas du modèle (a), la réponse structurale de cette paroi se manifeste par l'effet d'un arc horizontal dans l'épaisseur du mur perpendiculaire à l'action sismique. Sous l'effet de cette dernière, l'arc horizontal provoque une poussée latérale R appliquée aux intersections des parois et qui peut se décomposer en une composante orthogonale à la façade T et parallèle à l'action sismique et une autre composante horizontale H parallèle à la façade et perpendiculaire à l'action sismique (**Fig 5.4.11**).

Lors de l'activation de ce mécanisme et dans les conditions limites d'équilibre, trois charnières sont formées, une au milieu et deux autres aux intersections entre la façade et les murs perpendiculaires à celle-ci (**Fig 5.4.11**). L'effondrement se produit lorsque le mur de façade n'est pas assez solide ou s'il ne trouve pas d'éléments structuraux capables de contrecarrer la composante H . Dans le cas contraire, si la maçonnerie est suffisamment solide et enchaînée aux murs perpendiculaires, le mécanisme d'effondrement à ce moment ne peut avoir lieu alors que la partie interne de la façade sera soumise à de fortes contraintes de compression.

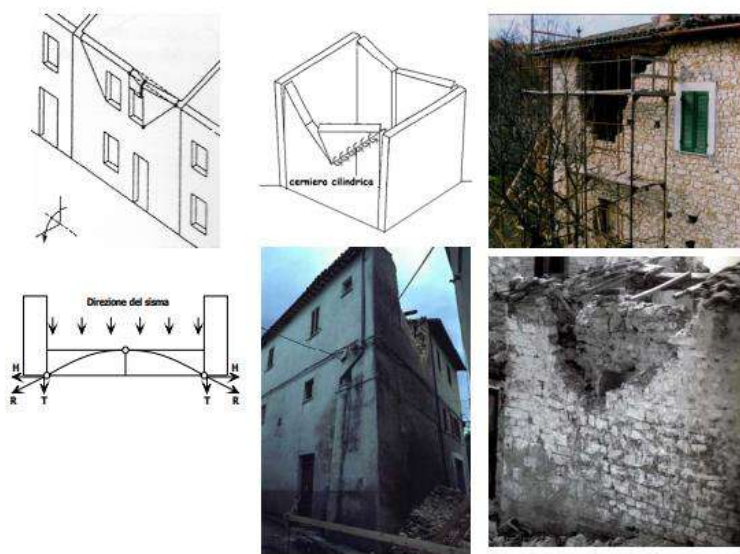


Fig 5.4.11 Schéma du mécanisme d'effondrement local par flexion horizontale (Source : (CNR-ITC, 2007))

B- Hors plan des façades : renversement composé

Les murs de maçonnerie par renversement composé (principalement aux angles) représentent également un autre mécanisme de défaillance local commun aux constructions de maçonnerie historiques. Ce mécanisme peut être causé par divers facteurs tels que : 1) absence de bordures ou chaînage horizontal aux niveaux supérieurs, 2) planchers déformables et / ou mal connectés, 3) présence de fortes poussées non contrecarrées sur le mur, 4) présence d'ouvertures situées près des intersections des murs et 5) propriétés mécaniques réduites de la maçonnerie.

Ce mécanisme a été déclenché et noté dans 3 directions aux CP suivants:

Direction + X: le CP 5-1 (**Fig 5.4.2 a**) avec un déplacement élastique égal à 8,5 mm correspondant à une force de cisaillement à la base de $3,58 E + 4$ kN (**Fig 5.4.3**).

Direction -X: les CP 5-6 et CP 5-10 (**Fig 5.4.4 a**) avec un déplacement élastique respectif égal à 6,3 et 6,1 mm correspondant à une force de cisaillement à la base de $3,57 E + 4$ KN (**Fig 5.4.5**).

Direction -Y: les CP 5-1, CP 5-6 et CP 5-10 (**Fig 5.4.8 a**) avec un déplacement élastique respectif égal à 6,2, 6,4 et 6,9 mm correspondant à un effort de cisaillement à la base de $3,59 E + 4$ KN (**Fig 5.4.9**).

L'absence de chaînage horizontal et la présence de planchers flexibles comme le modèle (a) ainsi que la présence d'ouvertures à proximité des intersections des murs représentent les principales causes de déclenchement de ce type de mécanisme pour l'agrégat en question (**Fig 5.4.12**).

Le renversement composé signifie tout d'abord les différentes situations dans lesquelles la rotation de la paroi orthogonale à l'action sismique est accompagnée d'une partie des parois perpendiculaires. Dans le cas où des planchers flexibles traditionnels non renforcés sont présents, le mécanisme de renversement composé peut provoquer le glissement d'un angle comme le cas de l'agrégat dans la direction + X (**Fig 5.4.12**) ou de plusieurs angles comme le cas dans la direction - X (**Fig 5.4.12**).

Ce mécanisme, qui représente une variante de renversement simple, est fortement influencé également par le type de maçonnerie et par la présence d'ouvertures dans les contreventements, dont dépendent notamment les dimensions et la configuration de l'angle de détachement.

La durée de l'analyse Pushover non linéaire varie de 12h à 22h en utilisant 8 processeurs.



Fig 5.4.12 Schéma du mécanisme de collapse local par rabatement composé (Source : (CNR-ITC, 2007))

Nous présentons dans le **Tab 5.4.6** une comparaison entre les résultats de l'analyse Pushover appliquée aux deux modèles (a) et (b).

	CP	Modèle (a)		Modèle (b)		Comparaison	
		Cisaillement à la base (KN) E+4	Déplacement au sommet (mm)	Cisaillement à la base (KN) E+4	Déplacement au sommet (mm)	%	%
Direction +X	5-1	3.58	8.5	3.59	8.0	6.3	-19.2
	5-3		9.0		6.1	32.2	
Direction -X	5-3	3.57	6.3	3.58	4.5	28.6	-18.1
	5-6		6.3		5.5	12.7	
	5-10		6.1		5.3	13.1	
Direction +Y	4-4	3.56	88.1	3.60	6.0	93.2	-93.2
Direction -Y	5-1	3.59	6.2	3.60	5.9	4.8	-8.1
	5-6		6.4		5.8	9.4	
	5-10		6.9		6.2	10.1	

Tab 5.4.6 Résumé des résultats de la PA appliquée aux deux modèles (a) et (b) (Source : auteur)

L'application de l'analyse Pushover au modèle (b) montre une réduction considérable du déplacement élastique de l'agrégat dans les 4 directions en appliquant les mêmes forces sismiques indiquées dans le [Tab 5.4.2](#).

L'insertion de planchers rigides représentés par des poutres de *Thuja* a également contribué à l'élimination de plusieurs mécanismes de rupture locaux précédemment détectés dans le modèle (a), à savoir :

Direction +X: la réponse structurale de l'agrégat montre une amélioration de 19,2% avec une réduction du déplacement élastique du CP 5-1 de 6,3% et la suppression du mécanisme local de repture par flexion horizontale notée au CP 5-3 ([Fig. 5.4.2](#)) avec une réduction de 32,2% ([Tab 5.4.6](#)).

Direction -X: la réponse structurale de l'agrégat montre une amélioration de 18,1% avec élimination du mécanisme local de repture par flexion horizontale au niveau de CP 5-3 ([Fig 5.4.4](#)) avec une réduction du déplacement élastique de 28,6% contrairement à 12,7 et 13,1% notés respectivement aux CP 5-6 et CP 5-10 ([Tab 5.4.6](#)).

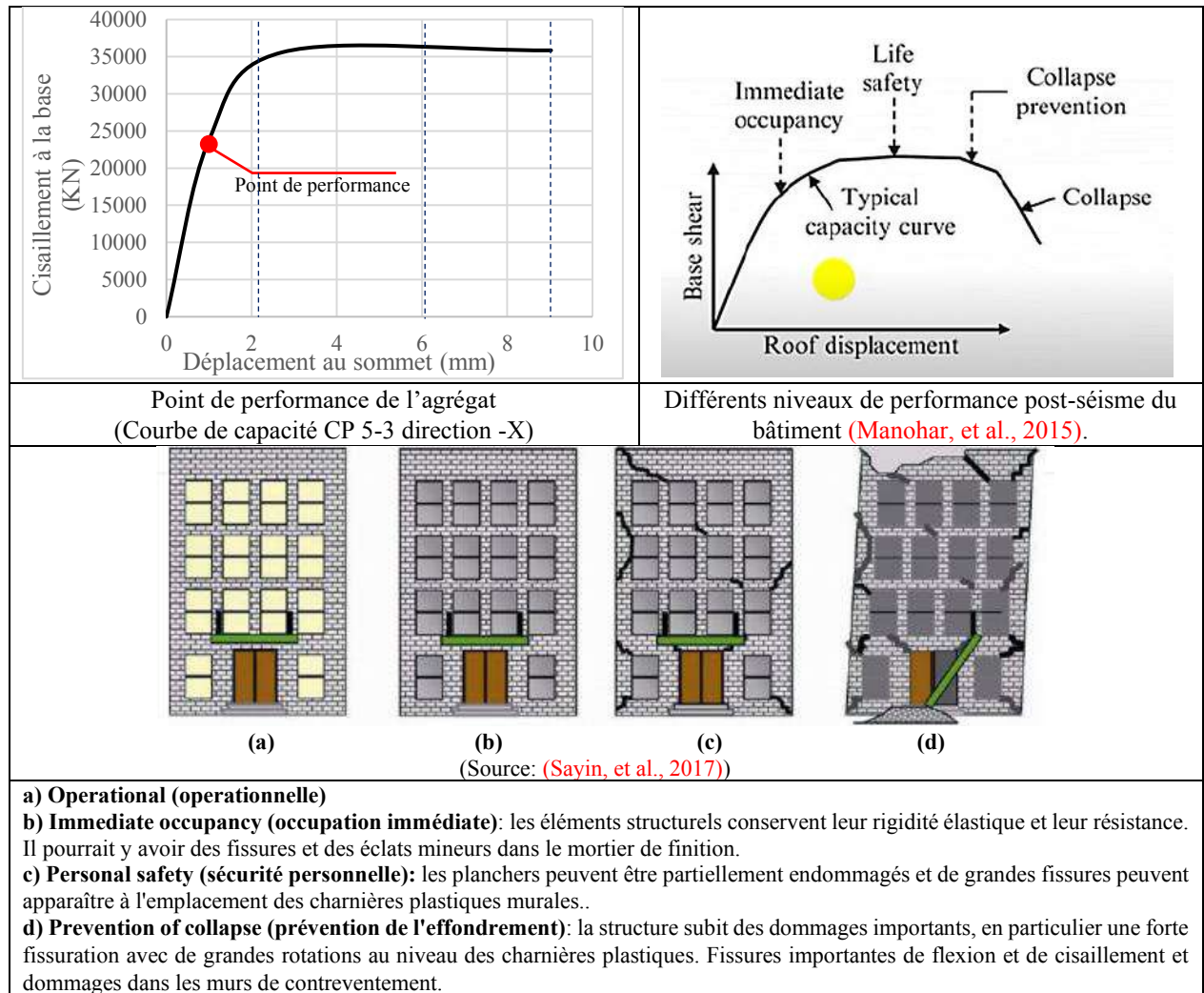
Direction +Y: la réponse structurale de l'agrégat montre une amélioration très significative de 93,2% ([Tab 5.4.6](#)) avec la suppression du mécanisme de rupture local par flexion horizontale notée au CP 4-4 ([Tab 5.4.6](#)).

Direction -Y: la réponse structurale de l'agrégat montre une amélioration moins importante que les précédentes de 8,1% avec une réduction du déplacement élastique de 4,8, 9,4 et 10,1% notée respectivement aux CP 5-1 CP 5-6 et CP 5- 10 ([Tab 5.4.6](#)).

L'application de la Méthode de Capacité Spectrale CSM et le traçage des courbes ADRS correspondant aux CPs les plus critiques dans les quatre directions démontrent une bonne réponse structurale générale de l'agrégat au séisme dont les caractéristiques (coefficient d'accélération, catégorie de type de sol et classification des bâtiments) sont présentées dans la [Section 5.4.2.3.1](#).

Le facteur de comportement structurel (q_u) est égal à 1,15. Il est calculé à partir de la **Fig 5.4.10** en se basant sur le rapport entre l'accélération de la structure à comportement élastique illimité $S_e(T^*)$ et l'accélération de la structure à résistance limitée F^*/m^* tel qu'il est exprimé dans (EN 1998-1, 2004). Le facteur de comportement calculé (q_u) n'étant pas supérieur à 4, satisfait à la condition de vérification stipulée dans (NTC, 2019).

La **Fig 5.4.10** et **Tab 5.4.** montrent que les points de performance dans les courbes ADRS se situent dans la phase croissante de la demande sismique spectrale dans toutes les directions, ce qui démontrent une rigidité significative de l'ensemble de l'agrégat. De plus, le point de performance dans la direction -X étant la plus vulnérable, est représenté et projeté dans la courbe de capacité (CP 5-3) afin de déduire le niveau de performance post-séisme de l'agrégat (**Tab. 5.4.7**). En se référant à (Manohar, et al., 2015) et (Sayin, et al., 2017), la courbe de capacité typique est composée de quatre étapes exprimant les différents états post-séisme du bâtiment comme indiqué dans le **Tab. 5.4.7**. Cependant, le niveau de performance de l'agrégat se situe dans la phase d'occupation immédiate dans laquelle les éléments de structure conservent leur rigidité élastique et leur résistance.



Tab. 5.4.7 Performance level confrontation of the aggregate (Source: author)

A partir des résultats obtenus de la PA, il ressort que les déformations et les mécanismes de repture enregistrés sont d'ordre local plutôt que global, ce qui est commun à de nombreuses structures de maçonnerie historiques. Ceci dit, l'application de l'analyse Pushover sur l'ensemble de l'agrégat, complexe de par sa typologie architecturale et structurelle et nécessitant un temps de modélisation, de paramétrage et de calcul très long, pourrait être réduite aux plus vulnérables macro-éléments.

La plus grande vulnérabilité de l'agrégat est notée dans la direction -X qui correspond à la plus faible accélération sismique qui a conduit le modèle numérique (a) à la rupture, à savoir $3,2 \text{ m/s}^2$ (Tab 5.4.2).

5.4.5.1.2 Conclusion

L'analyse Pushover non linéaire développée dans cette section et appliquée à l'ensemble de l'agrégat peut confirmer les conclusions et les résultats obtenus de l'analyse dynamique modale et de l'analyse Pushover linéaire.

En effet, l'agrégat a démontré une rigidité importante dans son comportement global dont l'accélération sismique la plus faible est égale à $3,2 \text{ m/s}^2$ et est enregistrée dans la direction -X correspondant à un déplacement élastique de 6,3 mm et un cisaillement de base égal à 3,57 KN aux CP 5-3 et CP 5-6. Néanmoins, des mécanismes de défaillance locaux ont été détectés dans toutes les directions conformément aux déformations enregistrées dans les 10 premiers modes d'analyse modale dynamique (Fig 5.3.2).

Les plus importants mécanismes locaux détectés à l'échelle de la macrostructure se manifestent par un hors plan des façades principales sous forme de flexion horizontale ou de renversement composé. Ces dommages sont répandus dans les constructions de maçonnerie historiques qui nécessitent des interventions structurelles préventives localisées.

La configuration géométrique de l'agrégat du fait de ses proportions dimensionnelles (Fig 2.2.2) ainsi que sa typologie architecturale et structurelle due à la répartition des masses ont conduit à une concentration des dommages principalement dans la maison de rive N°5 suivie de la maison N°4. En effet, la maison N°5 occupe l'extrémité ouest de l'agrégat et bénéficie de la plus grande surface et masse respectivement égale à 34% et 40%, tandis que la maison N°4 occupe 32% de la surface totale de la maison et une masse de 32%.

La comparaison entre les deux modèles (a) et (b) a réaffirmé l'importance de l'insertion des diaphragmes horizontaux rigides pour la réduction de la vulnérabilité sismique de l'agrégat. Ces diaphragmes constitués de solives de *Thuja* orientées dans des directions différentes pourraient encore améliorer le comportement à « caisson » de la structure s'ils bénéficiaient de renforcements localisés au niveau des liaisons poutre / mur comme indiqué dans la Section 6.2.3.2.

Enfin, le comportement sismique de l'agrégat à travers les résultats obtenus de l'analyse Pushover peut nous apporter une réponse à la problématique soulignée en amont de cette thèse. En effet, les dispositifs structurels empiriques et traditionnels utilisés lors de la reconstruction de la Casbah d'Alger à l'échelle des maisons ainsi que celle de l'agrégat, ont démontré un comportement structurel général rigide à l'échelle de la macrostructure.

5.4.5.2 Maisons désagrégées

Afin de comprendre la corrélation structurale entre les unités d'habitation et l'agrégat et d'identifier leur performance structurale dans les deux situations à savoir : 1) agrégée et 2) désagrégée, une désagrégation générale de la macrostructure a été réalisée donnant lieu à 4 unités constructives distinctes, à savoir :

Unité constructive CU 1 : comprend la maison de rive 1.

Unité constructive CU 2 : comprend les deux maisons centrales 2 et 3 structurellement inséparables compte tenu du nombre d'entrelacements spatiaux enregistrés entre elles.

Unité constructive CU 3 : comprend la maison de rive 5.

Unité constructive CU 4 : comprend la maison de rive 4.

Nous présentons dans la [Fig 5.4.13](#), les quatre unités constructives après désagrégation, leur maillage 3D par Eléments Finis ainsi que la distribution des CP respectifs.

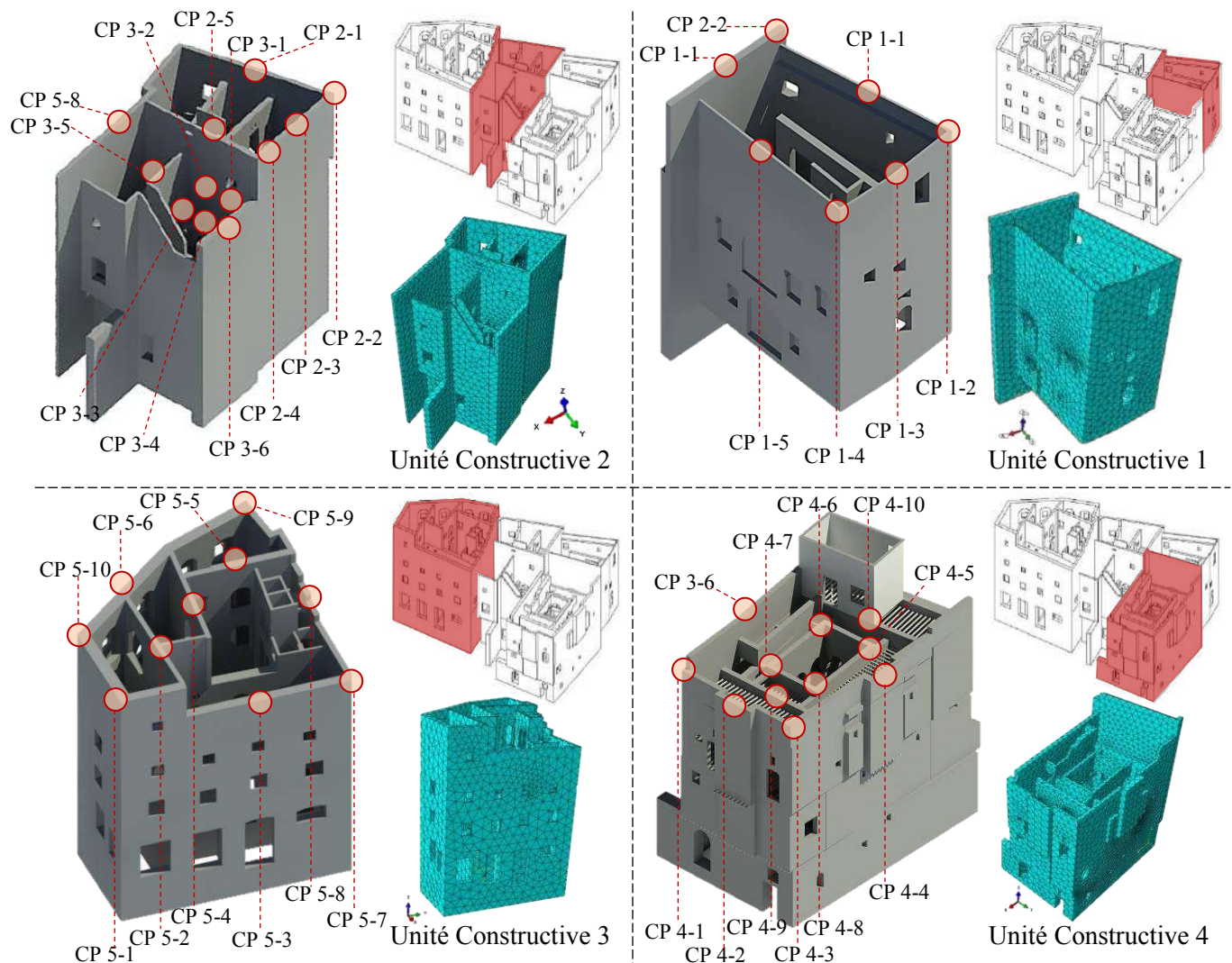


Fig 5.4.13 Unités constructives après désagrégation (Source : auteur)

Afin d'analyser la performance structurale des maisons et de mener une étude comparative de leurs états agrégés et désagrégés, les accélérations mentionnées dans le **Tab 5.4.2** appliquées à l'agrégat (modèle (a)) ont constitué la référence de départ pour les unités constructives. Les résultats sont présentés ci-dessous.

5.4.5.2.1 Unité constructive (UC) 01

Une application complète des accélérations mentionnées dans le **Tab 5.4.2** a été réalisée sur l'unité de construction 01.

Direction + X

Aucun mécanisme de défaillance local n'a été détecté dans la direction + X comme le montre la **Fig 5.4.14**, les courbes de capacité sont tracées pour tous les CP relatifs à l'UC 1 dans les deux états (agrégé et désagrégé) (**Fig 5.4.15**).

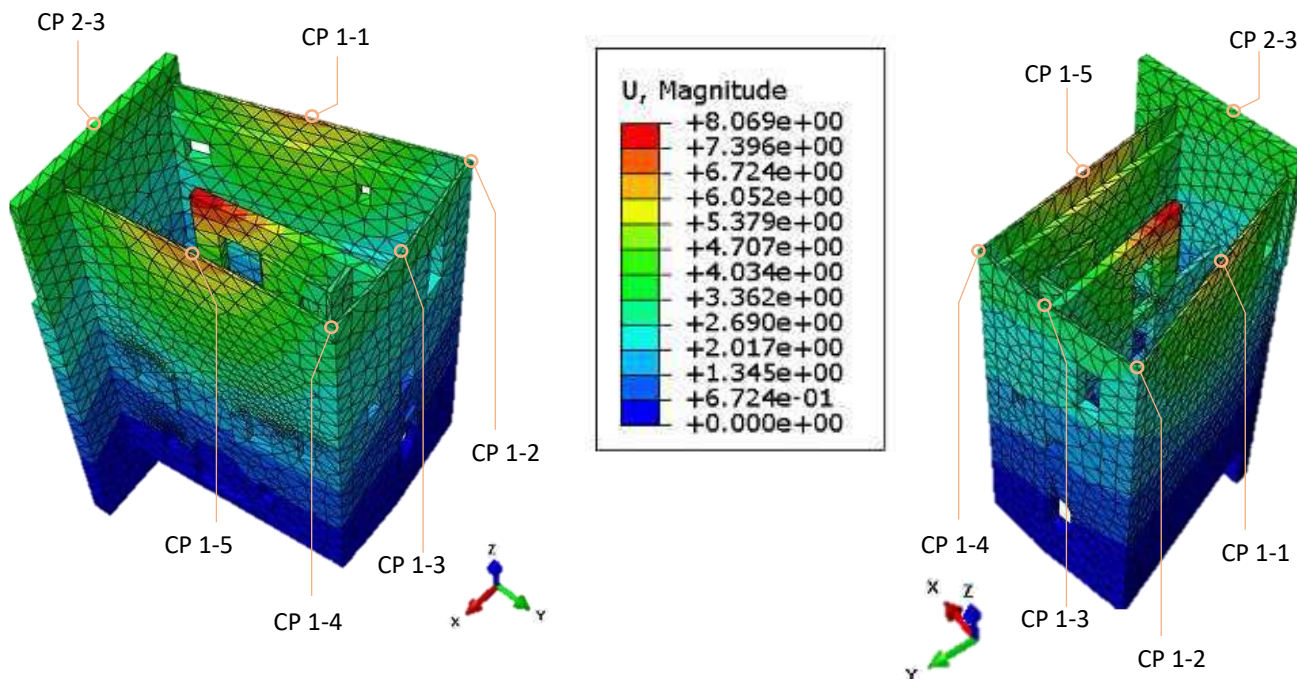
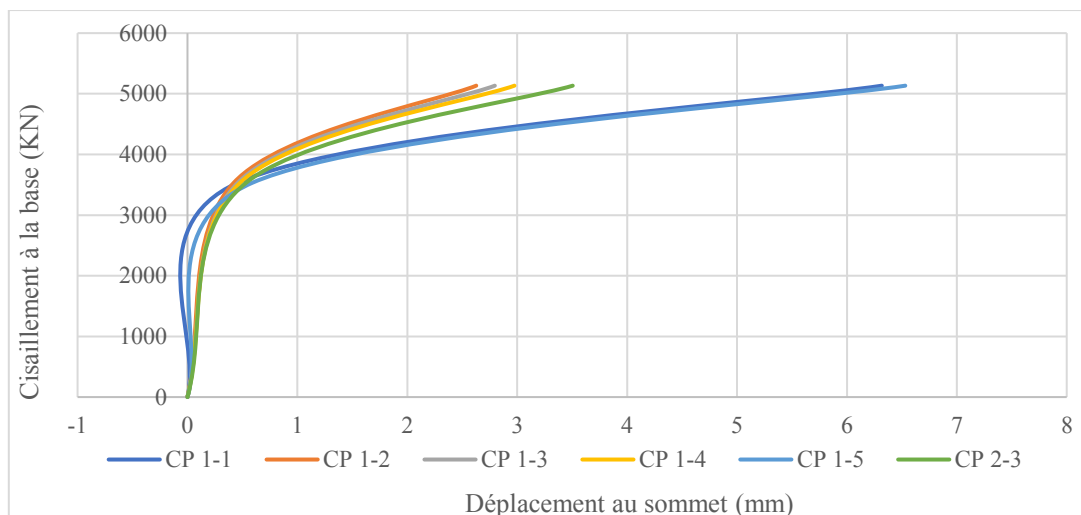
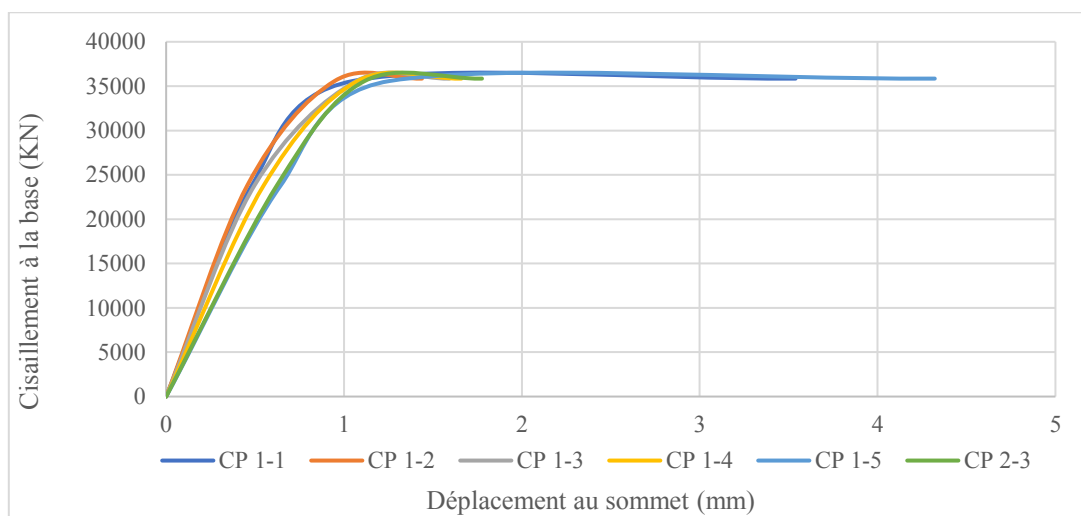


Fig 5.4.14 Résultats de la PA non-linéaire direction +X: UC 1 (Source: auteur).



a)



b)

Fig 5.4.15 Courbes de capacité direction +X: UC 1 (Source: auteur)

1) désagrégées (a); 2) agrégées (b)

Direction -X

On note un mécanisme de repture local correspondant au point de contrôle CP 1-1 (**Fig 5.4.16**), les courbes de capacité sont tracées pour tous les CP (**Fig 5.4.17**).

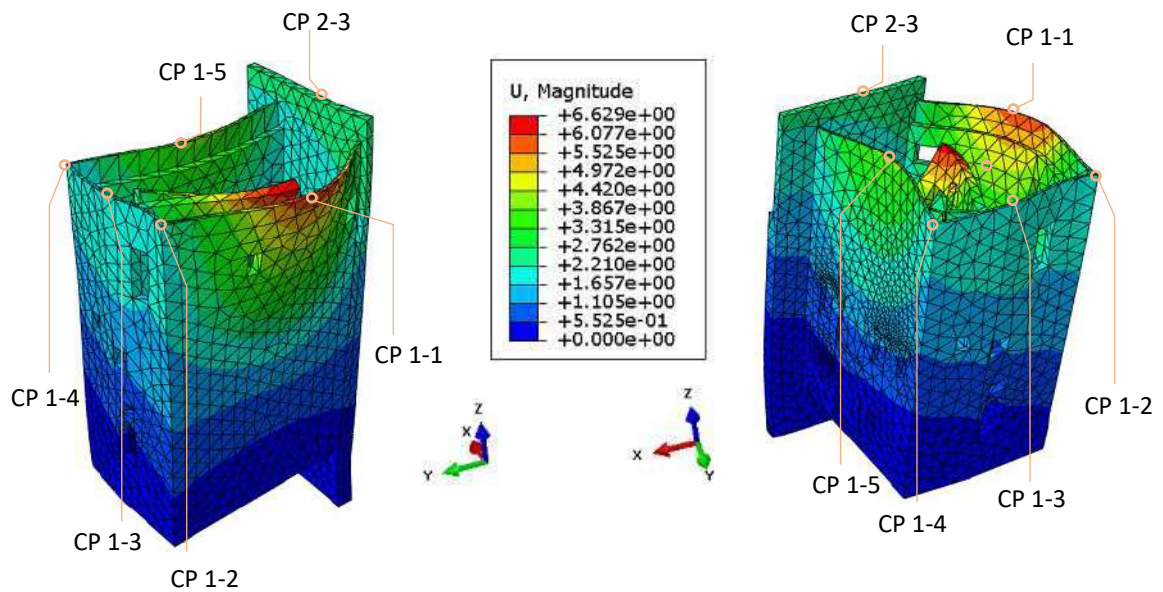
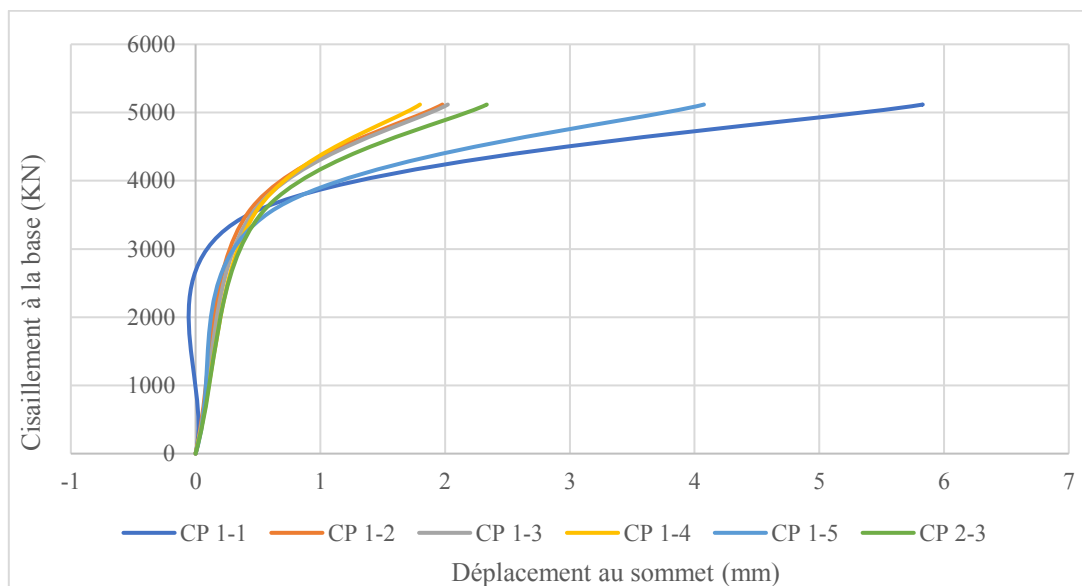
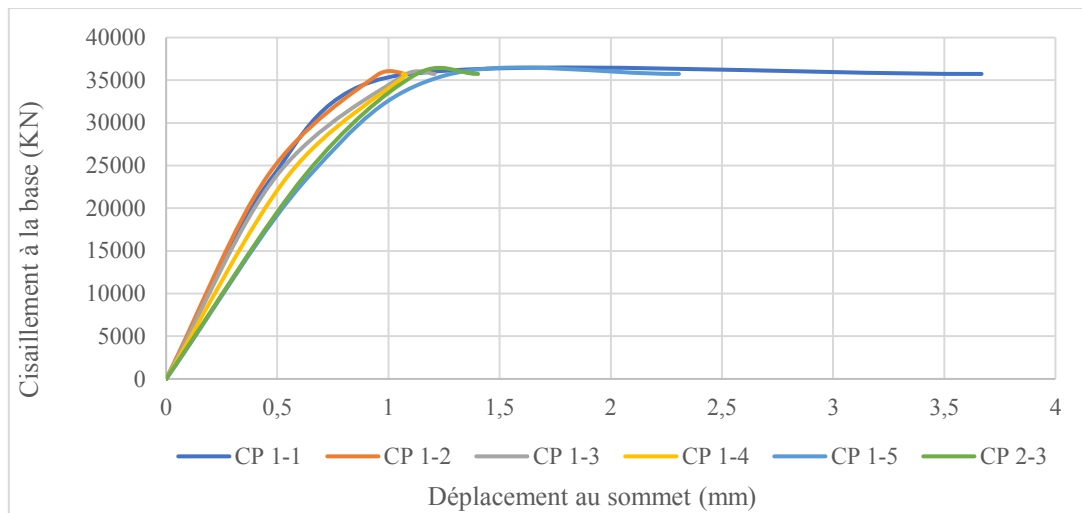


Fig 5.4.16 Résultats de la PA non-linéaire direction -X: UC 1 (Source: auteur).



a)



b)

Fig 5.4.17 Courbes de capacité direction -X : UC 1 (Source: auteur)

1) désagrégées (a); 2) agrégées (b)

Direction +Y

On note des mécanismes de rupture locaux correspondant aux points de contrôle CP 1-1, CP 1-3 et CP 2-3 (**Fig 5.4.18**). Les courbes de capacité sont tracées pour tous les CP (**Fig 5.4.19**).

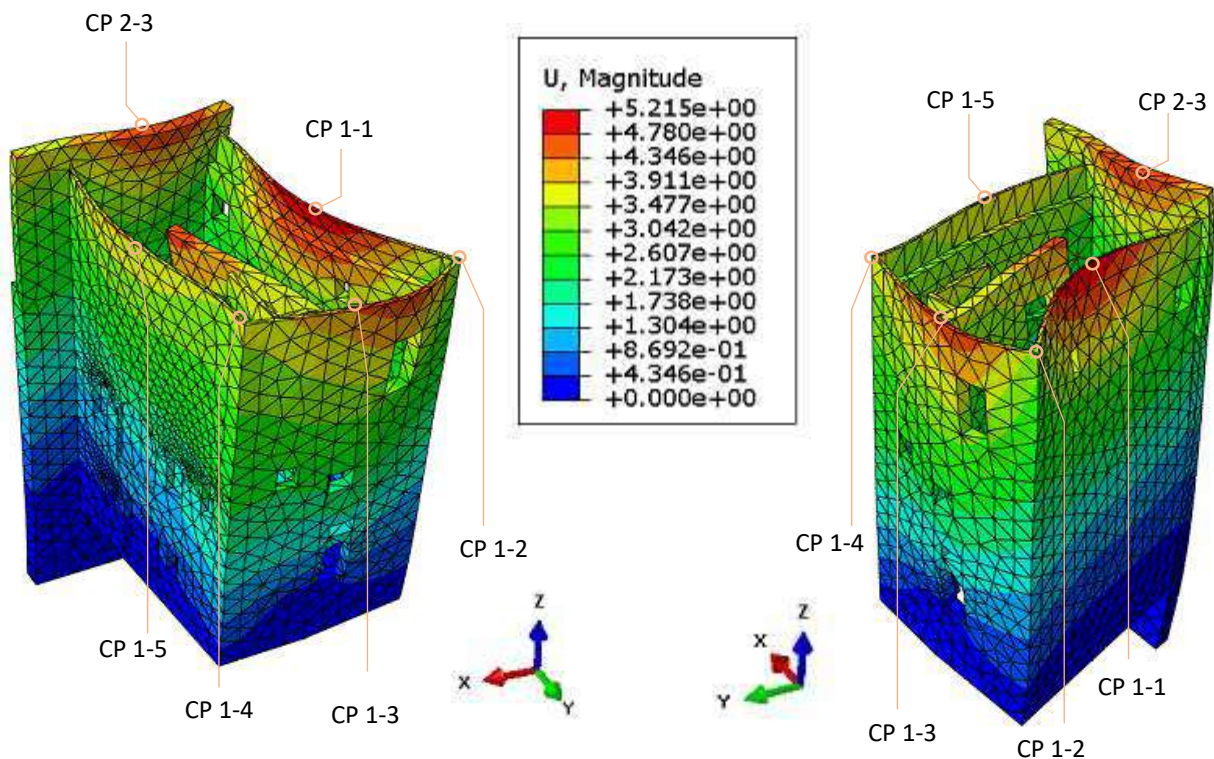
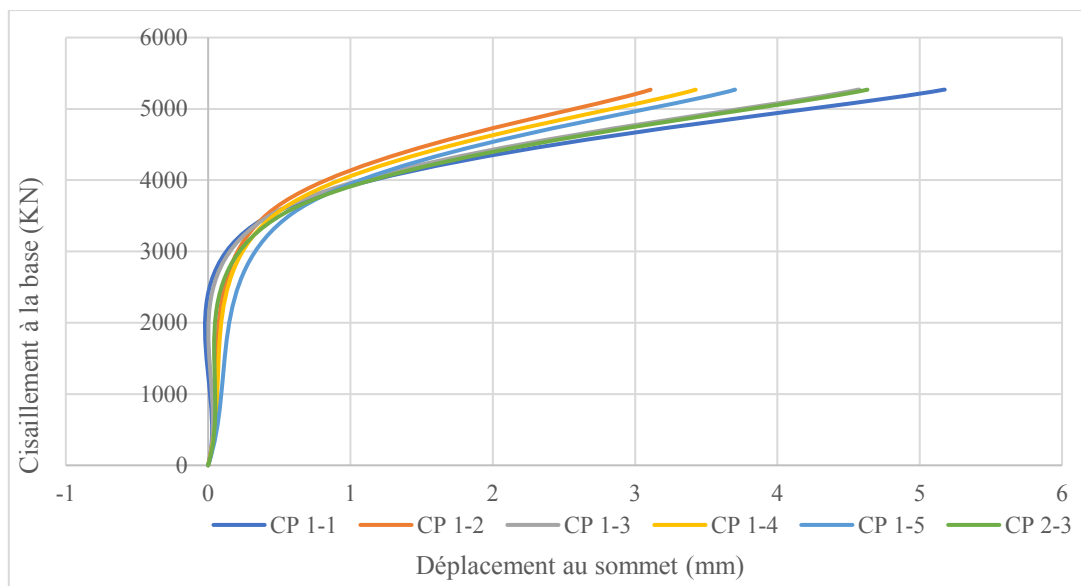
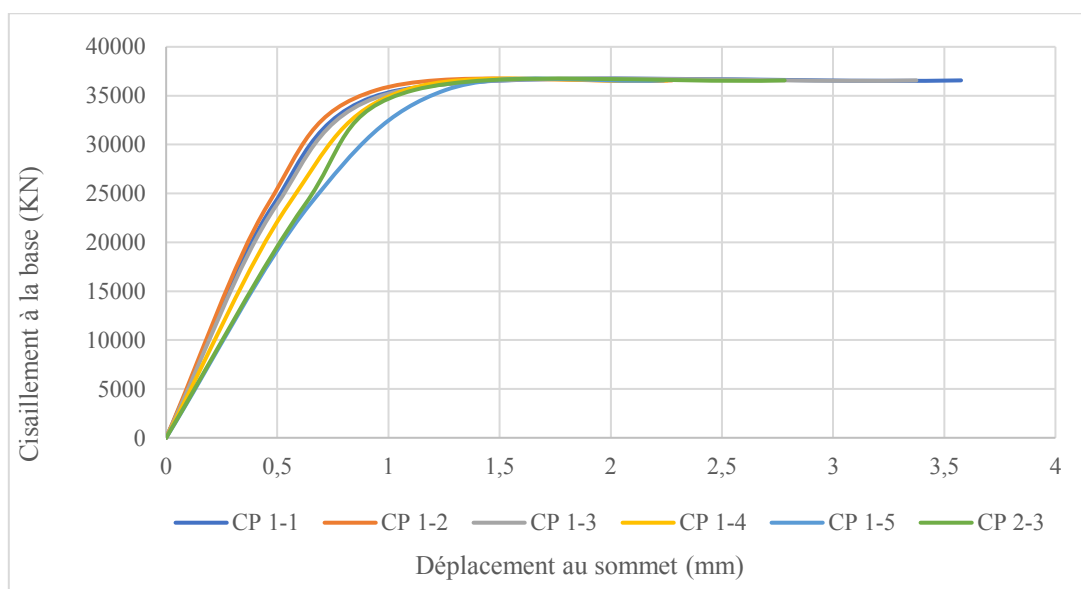


Fig 5.4.18 Résultats de la PA non-linéaire direction +Y: UC 1 (Source: auteur).



a)



b)

Fig 5.4.19 courbes de capacité direction +Y : UC 1 (Source : auteur)
1) désagrégées (a); 2) agrégées (b)

Direction -Y

Un mécanisme de repture local est noté au point de contrôle CP 1-1 ([Fig 5.4.20](#)). Les courbes de capacité de tous les CP sont tracées et présentées dans la [Fig 5.4.21](#).

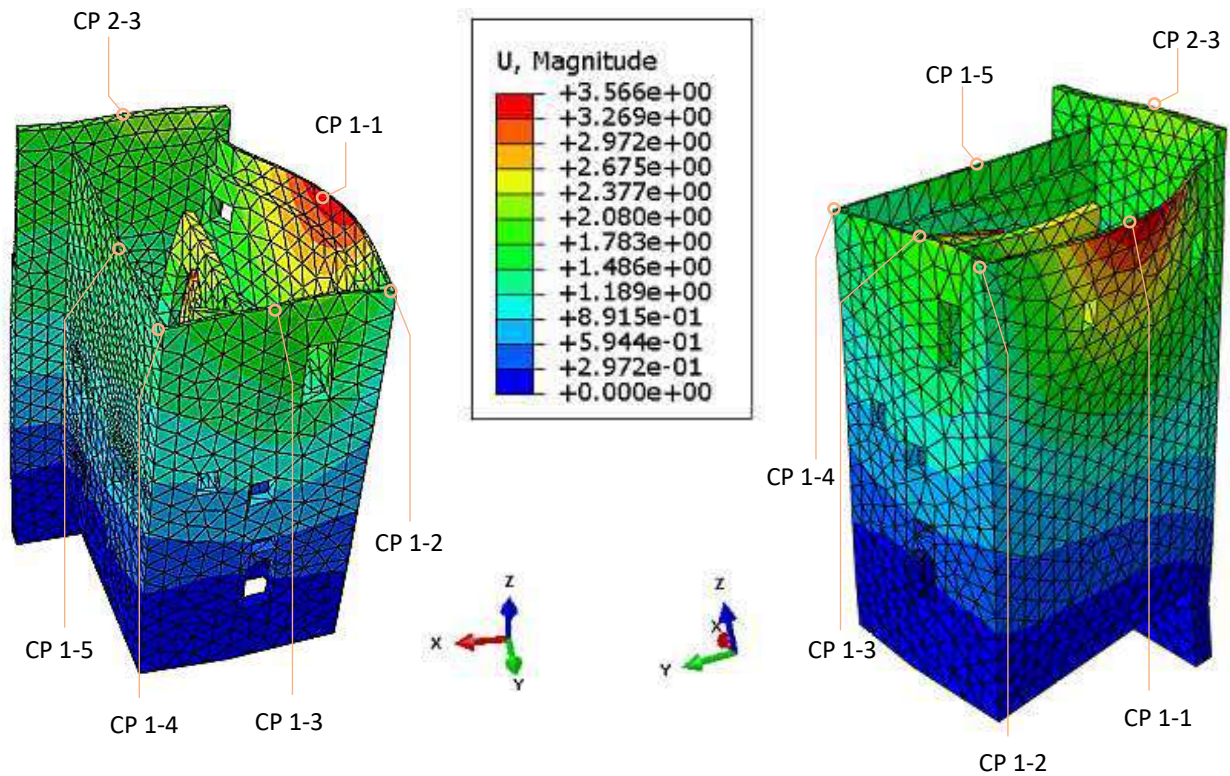
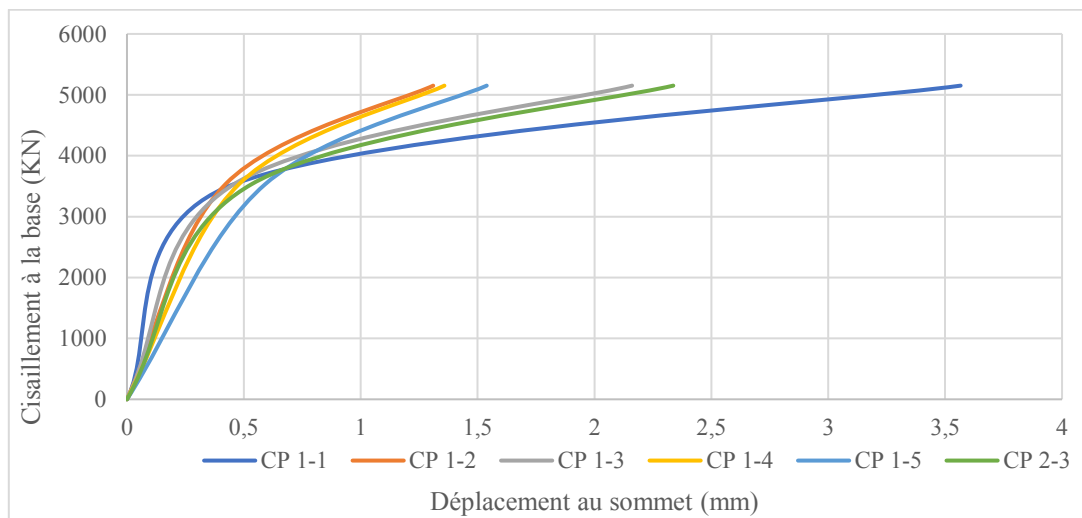
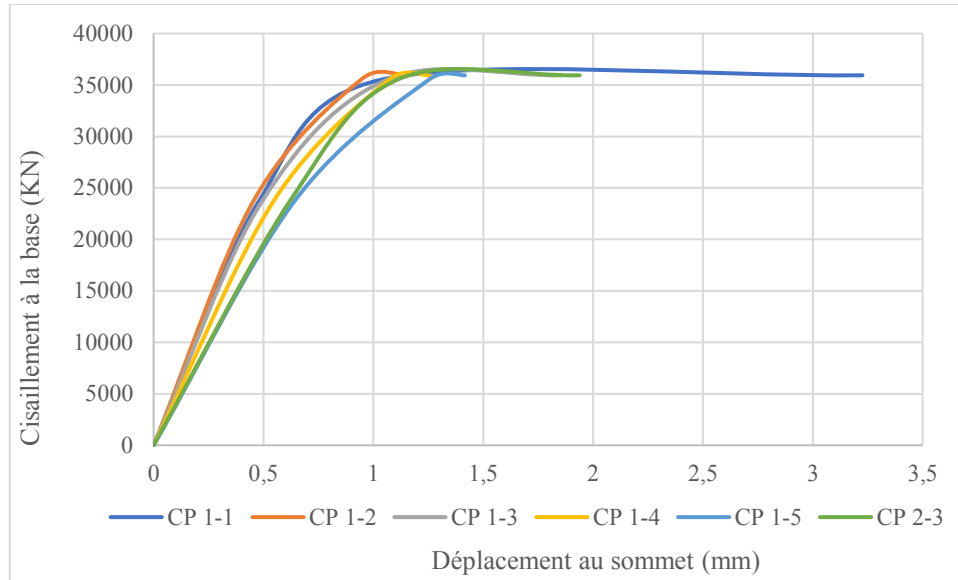


Fig 5.4.20 Résultats de la PA non-linéaire direction -Y: UC 1 (Source : auteur).



a)



b)

Fig 5.4.21 courbes de capacité direction -Y: UC 1 (Source: auteur)
1) désagrégées (a); 2) agrégées (b)

5.4.5.2.2 Unité Constructive (UC) 02

Une application complète des accélérations mentionnées dans le **Tab 5.4.2** a été réalisée sur l'unité de construction 02.

Direction + X

Aucun mécanisme de rupture local n'a été détecté dans la direction + X comme le montre la **Fig 5.4.22**. Les courbes de capacité sont tracées pour tous les CP et présentées dans la **Fig 5.4.23**.

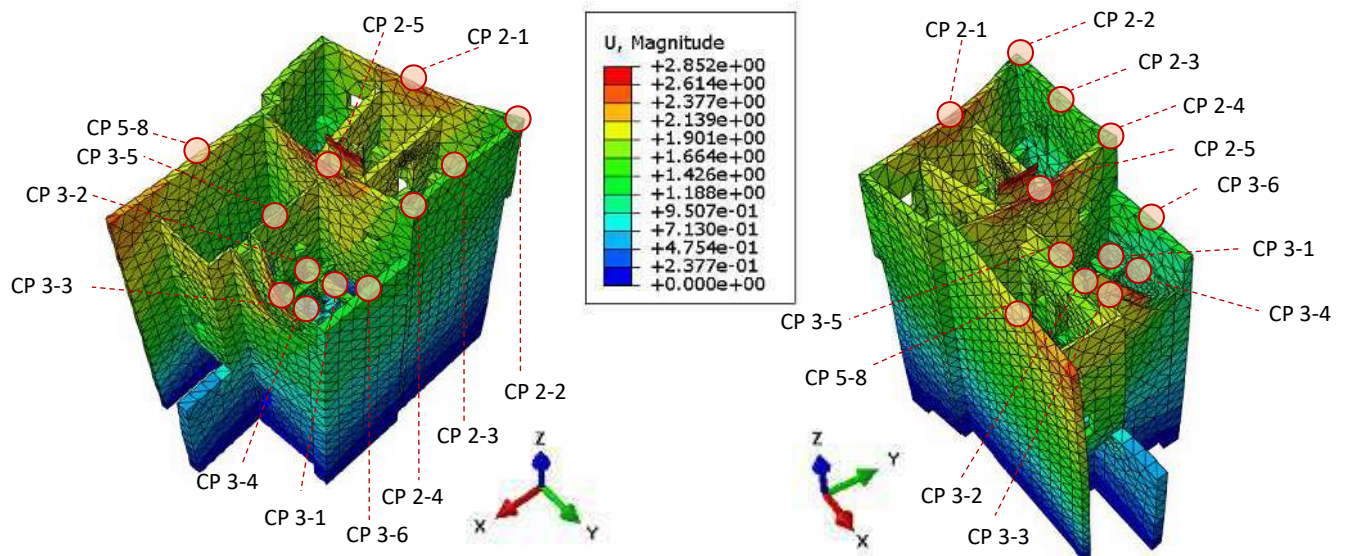
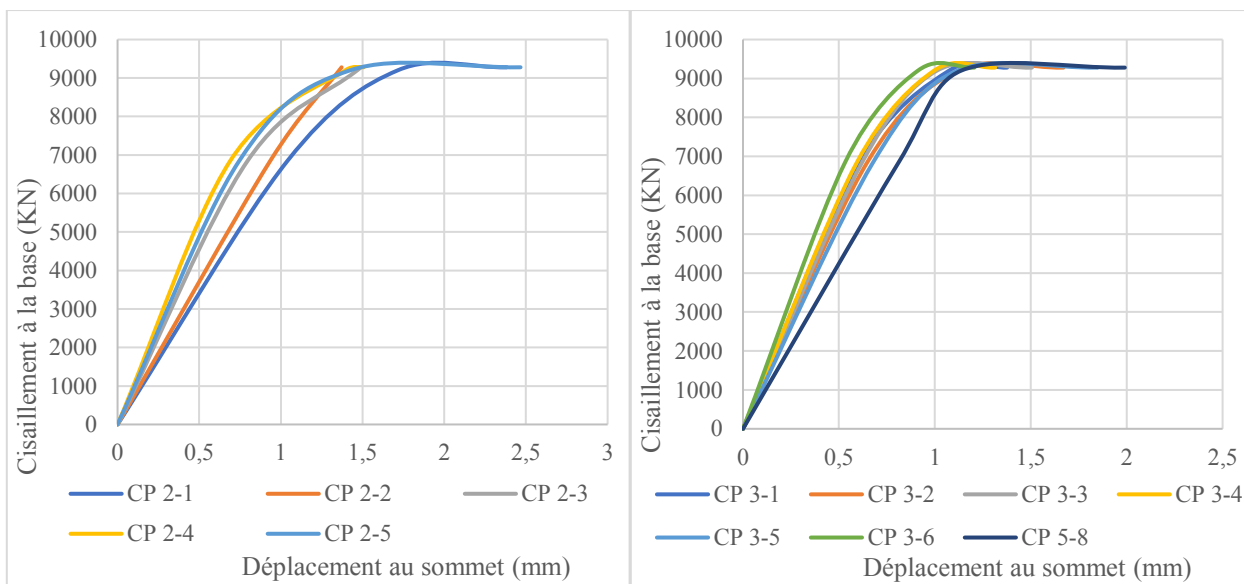
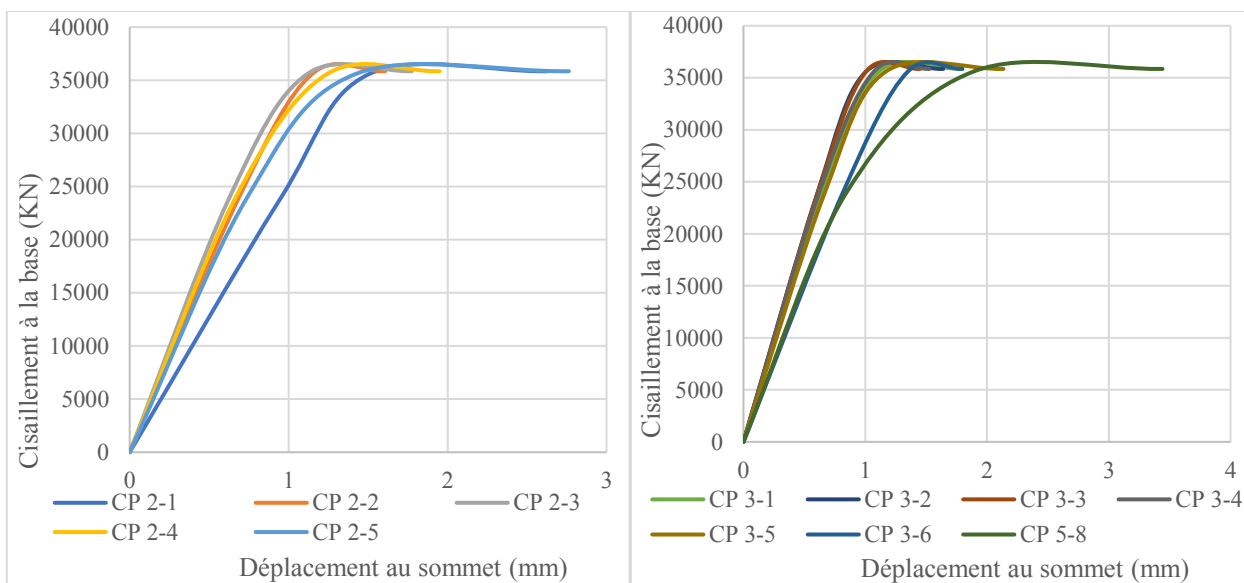


Fig 5.4.22 Résultats de la PA non-linéaire direction +X: UC 2 (Source: auteur).



a)



b)

Fig 5.4.23 Courbes de capacité direction +X : UC 2 (Source : auteur)

1) désagrégées (a); 2) agrégées (b)

Direction -X

Un mécanisme de repture local est noté au point de contrôle CP 2-1 (Fig 5.4.24). Les courbes de capacité de tous les CP sont tracées et présentées dans la Fig 5.4.25.

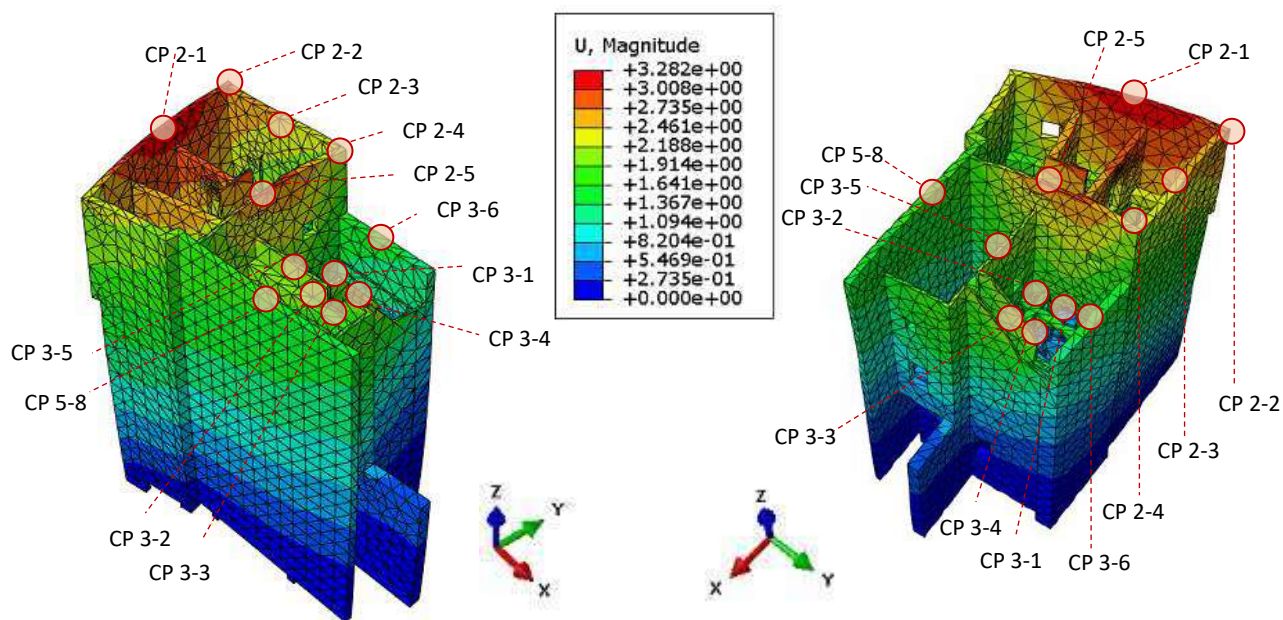
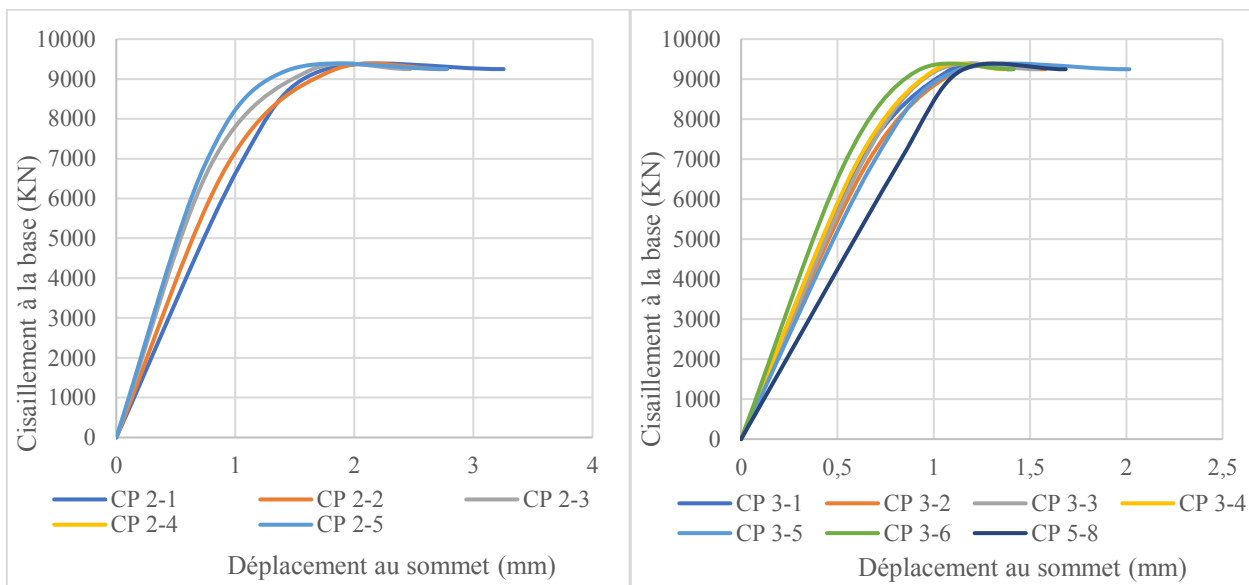
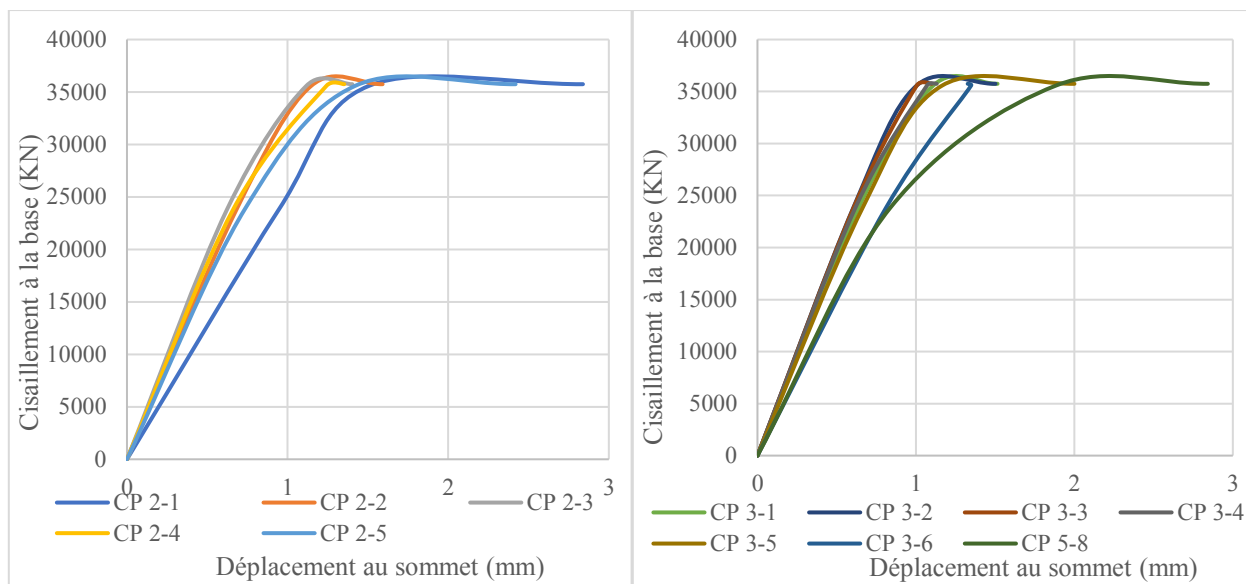


Fig 5.4.24 Résultats de la PA non-linéaire direction -X : UC 2 (Source : auteur).



a)



b)

Fig 5.4.25 Courbes de capacité direction -X : UC 2 (Source : auteur)

1) désagrégées (a); 2) agrégées (b)

Direction +Y

Un mécanisme de repture local est enregistré au point de contrôle CP 2-3 (Fig 5.4.26). Les courbes de capacité de tous les CP sont tracées et présentées dans la Fig 5.4.27.

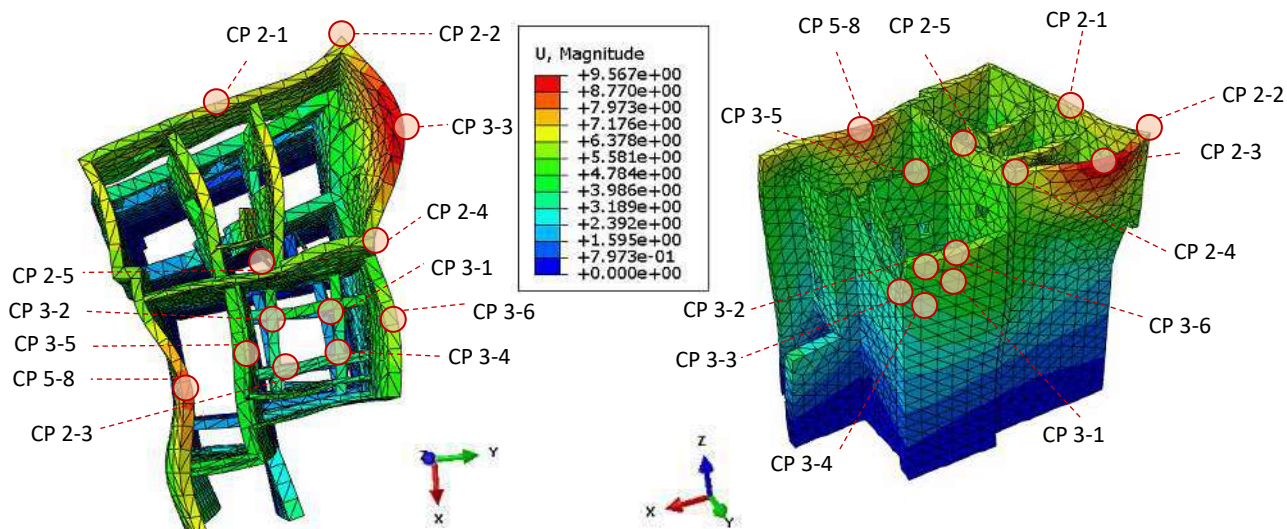
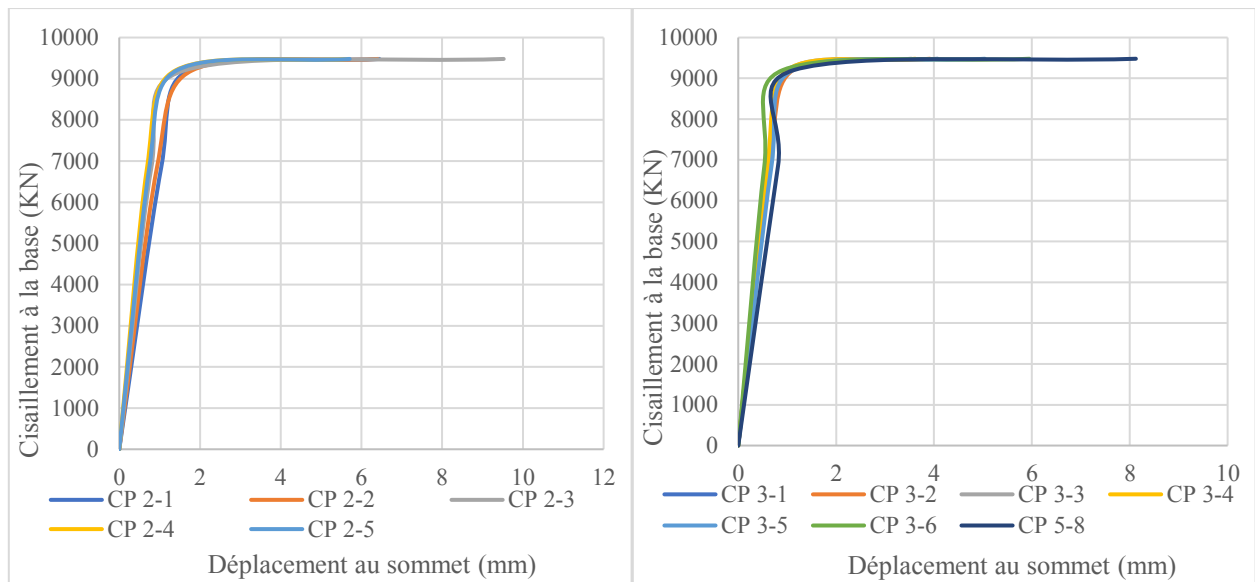
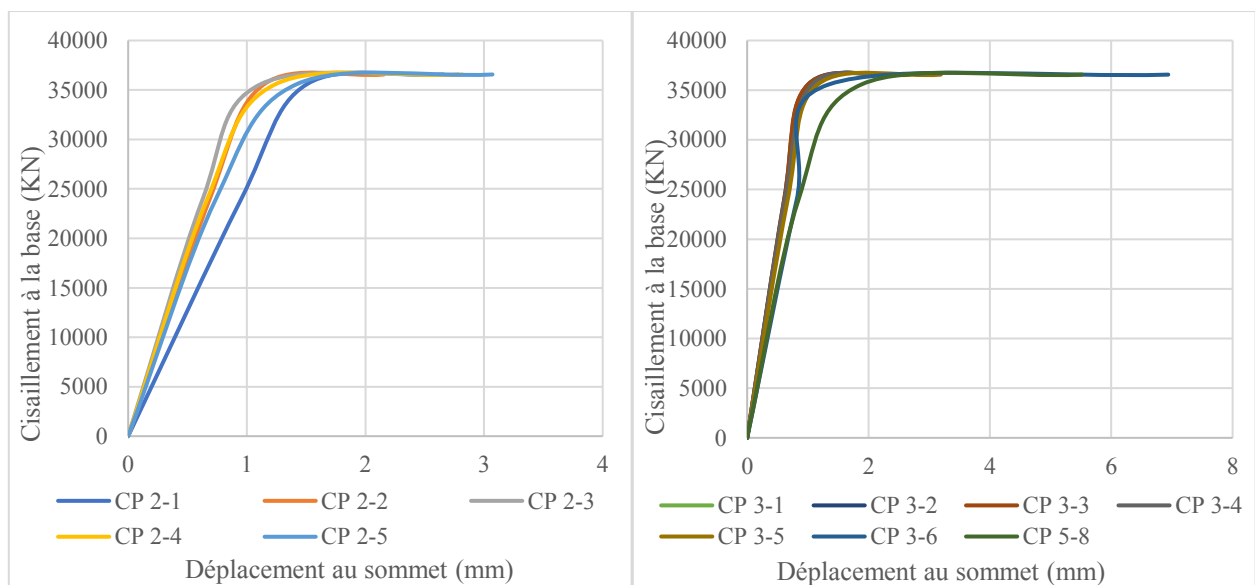


Fig 5.4.26 Résultats PA non-linéaire direction +Y : CU 2 (Source: auteur).



a)



b)

Fig 5.4.27 Courbes de capacité direction +Y : UC 2 (Source: auteur)

1) désagrégées (a); 2) agrégées (b)

Direction -Y

Des mécanismes de rupture locaux sont notés aux points de contrôle CP 2-3 et CP 5-8 (**Fig 5.4.28**). Les courbes de capacité de tous les CP sont tracées et présentées sur la **Fig 5.4.29**.

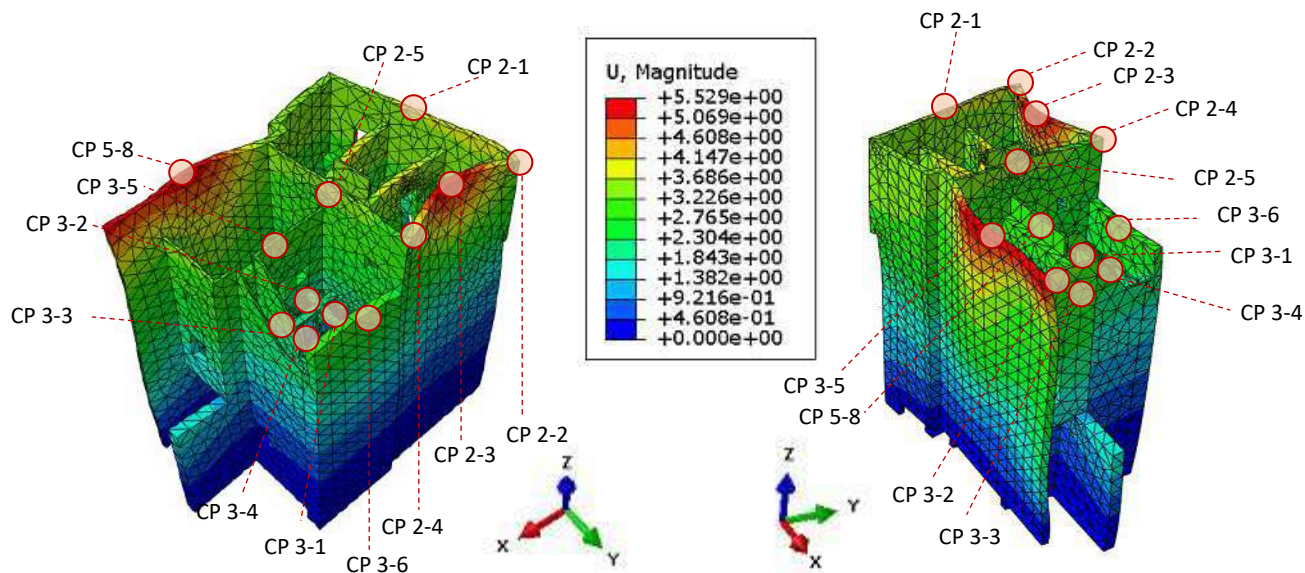
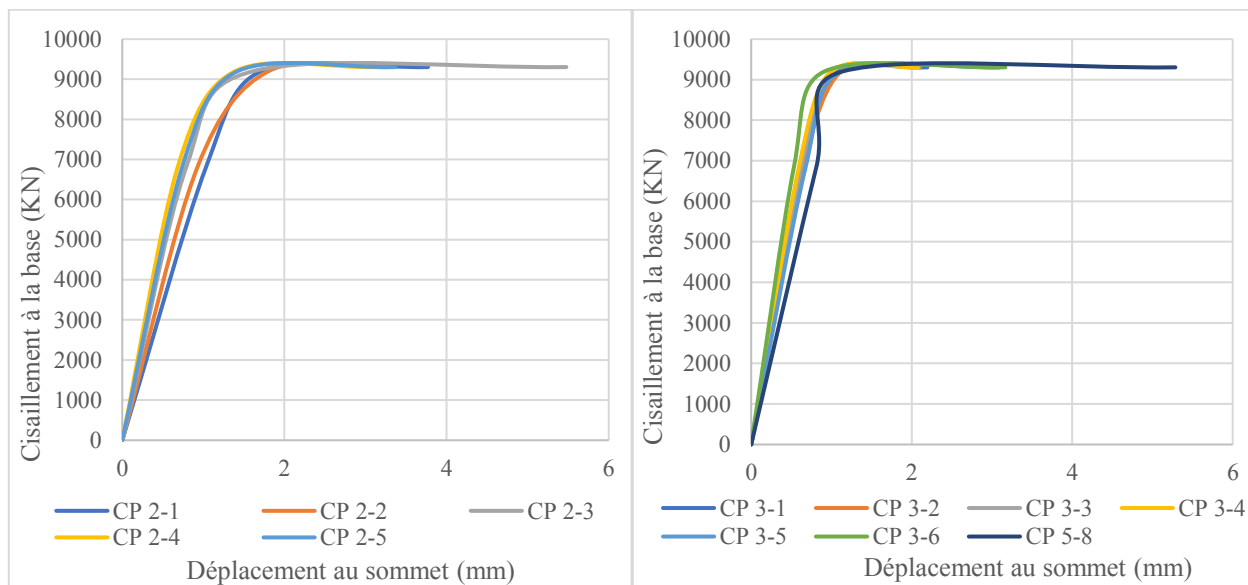
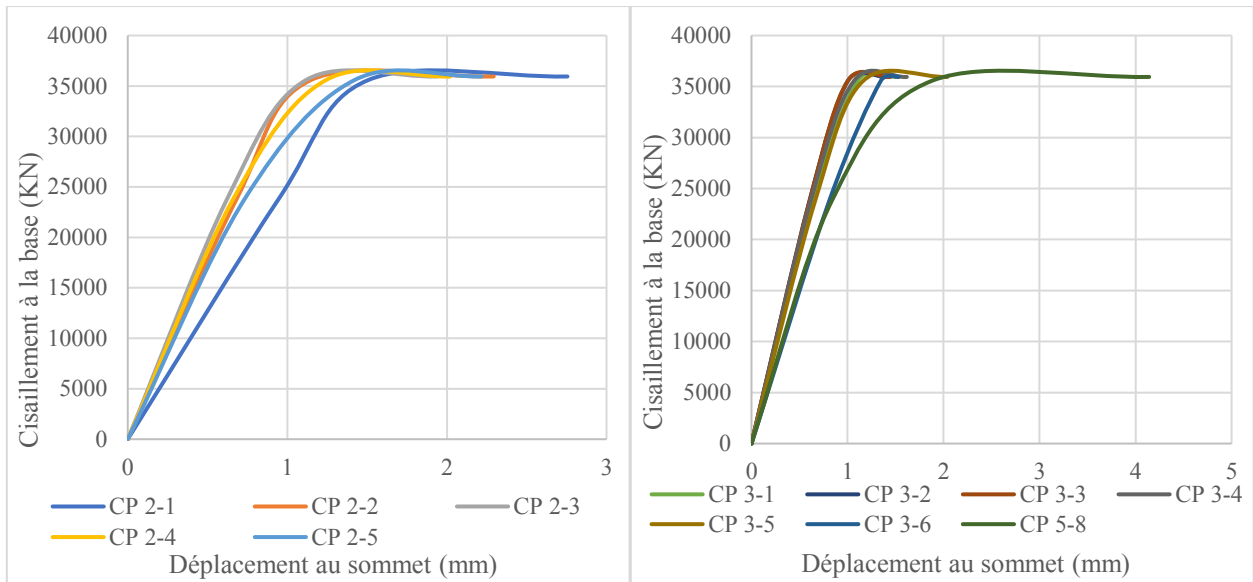


Fig 5.4.28 Résultats de la PA non-linéaire direction -Y : UC 2 (Source : auteur).



a)



b)

Fig 5.4.29 Courbes de capacité direction -Y : UC 2 (Source: auteur)
1) désagrégées (a); 2) agrégées (b)

5.4.5.2.3 Unité Constructive (UC) 03

L'application des accélérations horizontales utilisées pour l'agrégat (modèle (a)) n'a pas pu être réalisée sur l'Unité Constructive UC 03 en raison de la non-convergence du modèle, nous avons donc procédé par une réduction des valeurs jusqu'à sa convergence (**Tab 5.4.8**).

	Direction			
	+X	-X	+Y	-Y
Accélération initiale (m/s^2) (aggregate)	4.15	3.2	8	4.8
Accélération finale (m/s^2)	3.3	1.8	4.5	1.8

Tab 5.4.8 PA non linéaire : accélération sismique appliquée à CU 03 (Source : auteur)

Direction +X

On note des mécanismes de repture locaux aux points de contrôle CP 5-1 et CP 5-3 (**Fig 5.4.30**). Les courbes de capacité de tous les CP correspondant à l'UC 3 sont tracées et présentées dans la **Fig 5.4.31**.

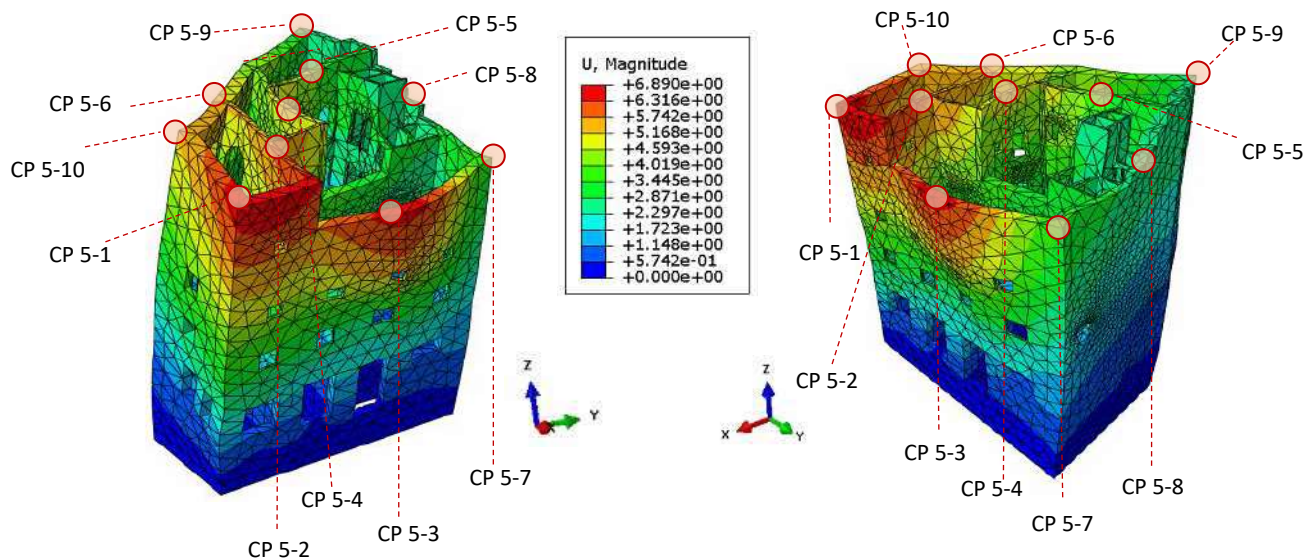
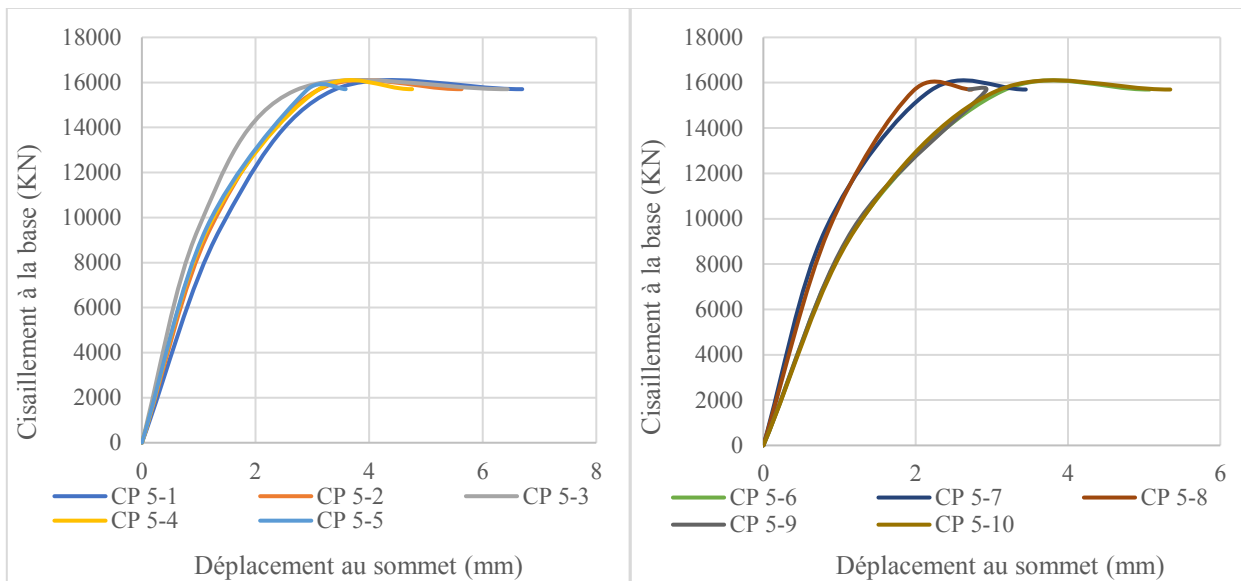
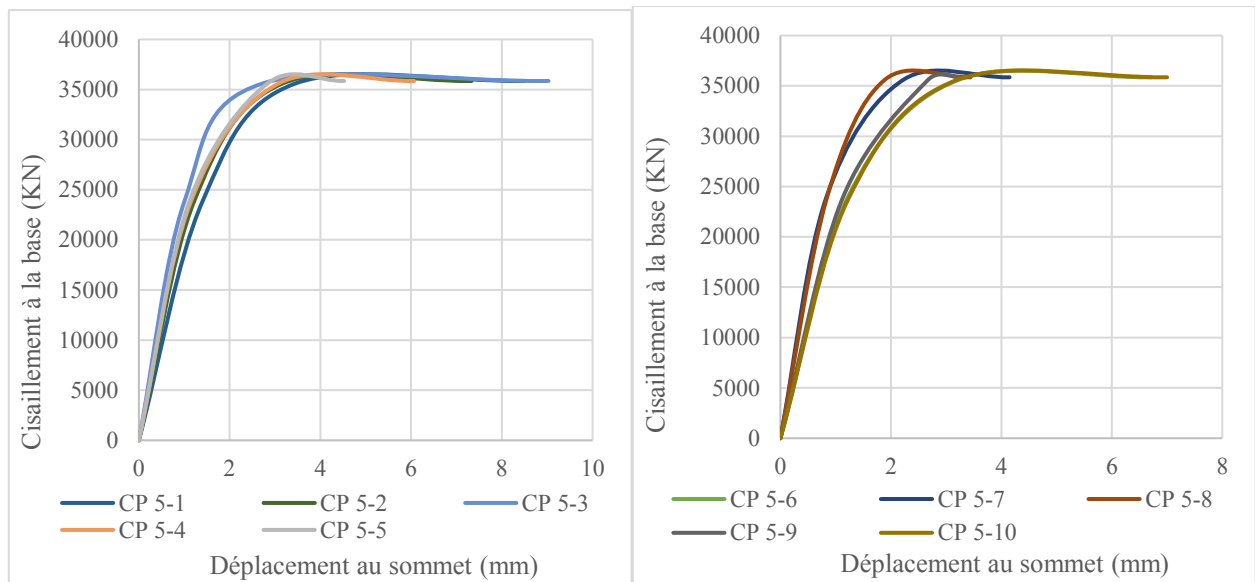


Fig 5.4.30 Résultats de la PA non-linéaire direction +X : UC 3 (Source : auteur).



a)



b)

Fig 5.4.31 courbes de capacité direction +X : UC 3 (Source : auteur)

1) désagrégées (a); 2) agrégées (b))

Direction -X

Des mécanismes de rupture locaux sont enregistrés aux points de contrôle CP 5-10 et CP 5-9 (Fig 5.4.32). Les courbes de capacité de tous les CP correspondant à l'UC 3 sont tracées et présentées dans la Fig 5.4.33.

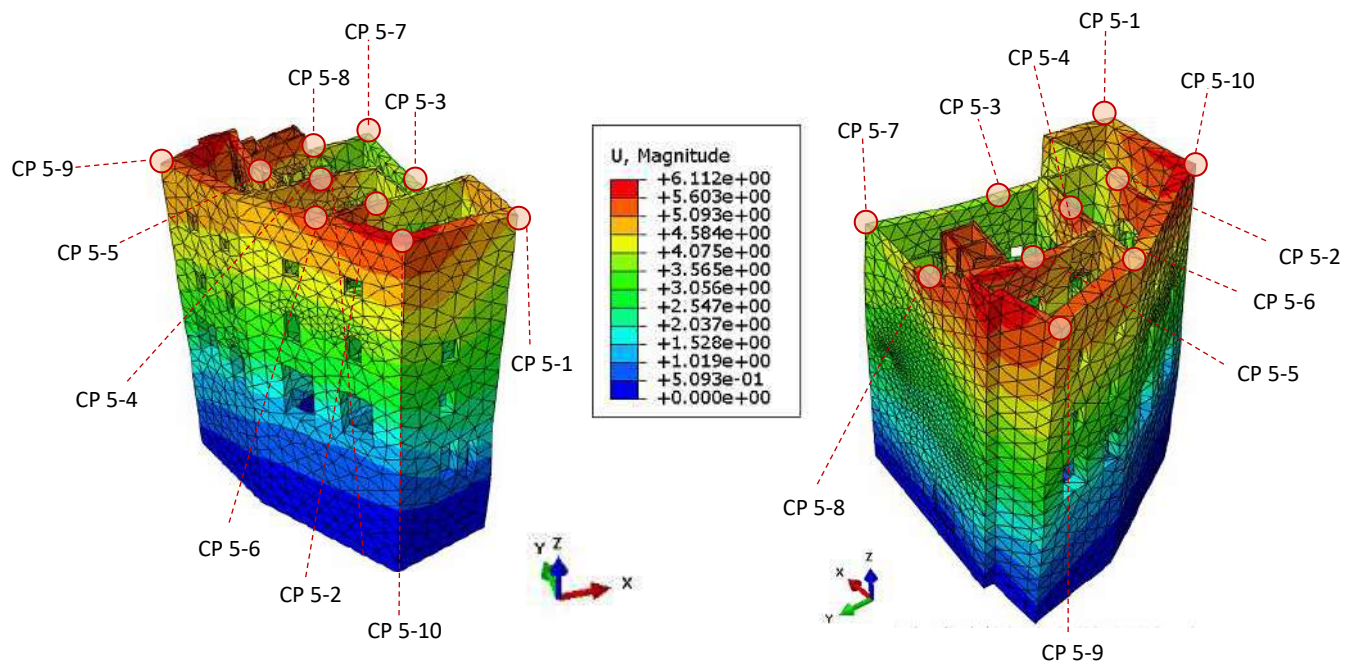
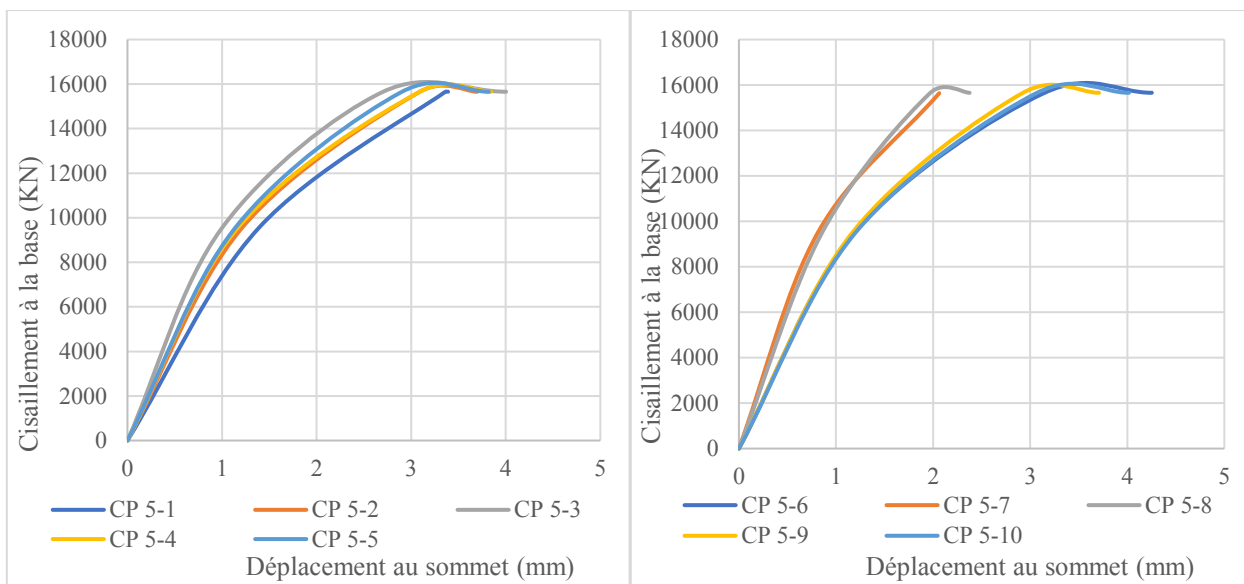
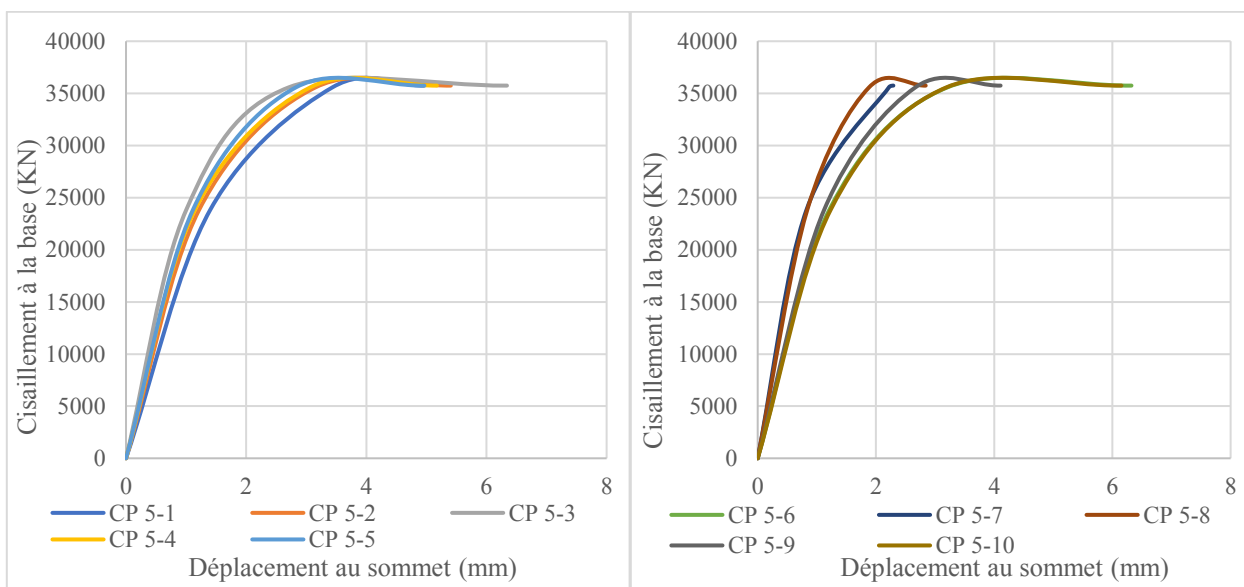


Fig 5.4.32 Résultats de la PA non-linéaire direction -X : UC 3 (Source : auteur).



a)



b)

Fig 5.4.33 courbes de capacité direction -X : UC 3 (Source : auteur)
1) désagrégées (a); 2) agrégées (b))

Direction +Y

Des mécanismes de rupture locaux sont enregistrés aux points de contrôle CP 5-3, CP 5-6 et CP 5-10 (Fig 5.4.34). Les courbes de capacité de tous les CP de l'UC 3 sont tracées et présentées dans la Fig 5.4.35.

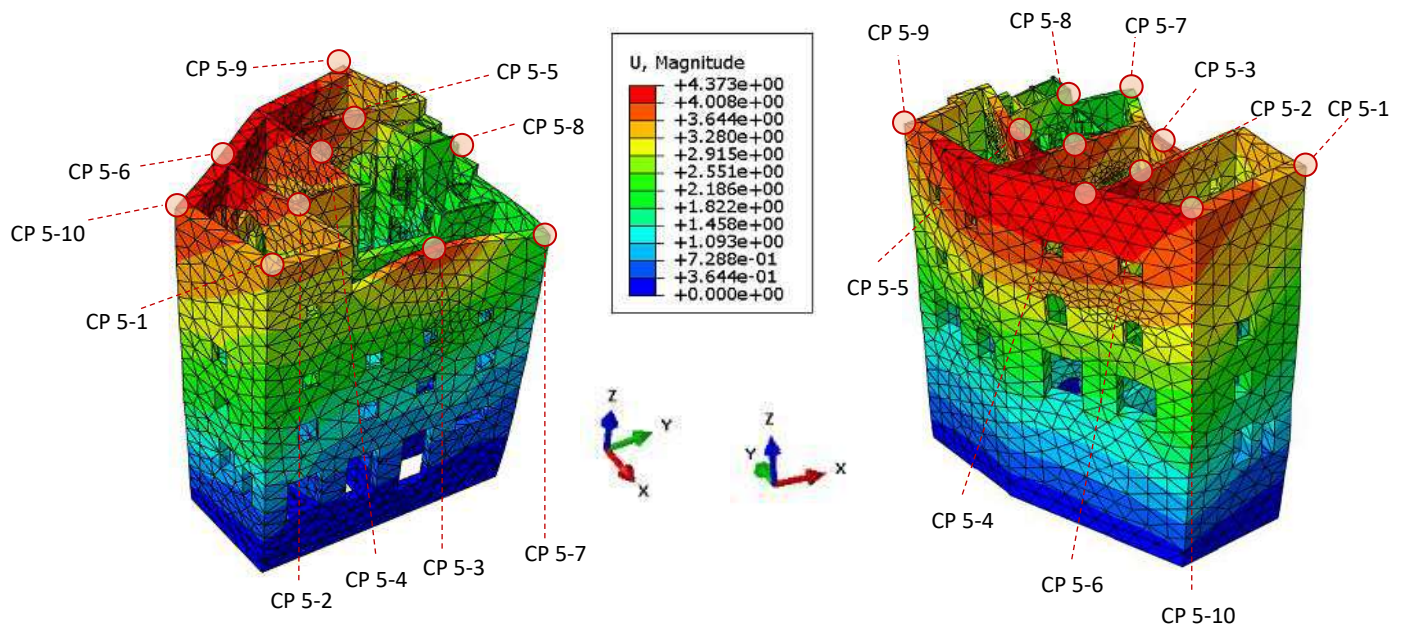
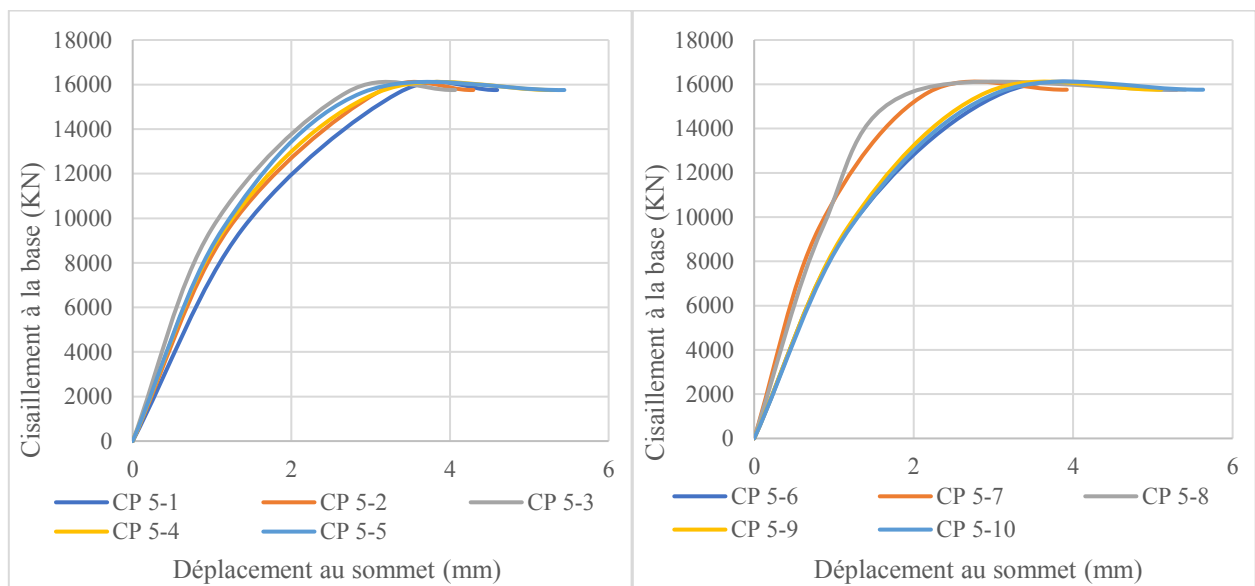
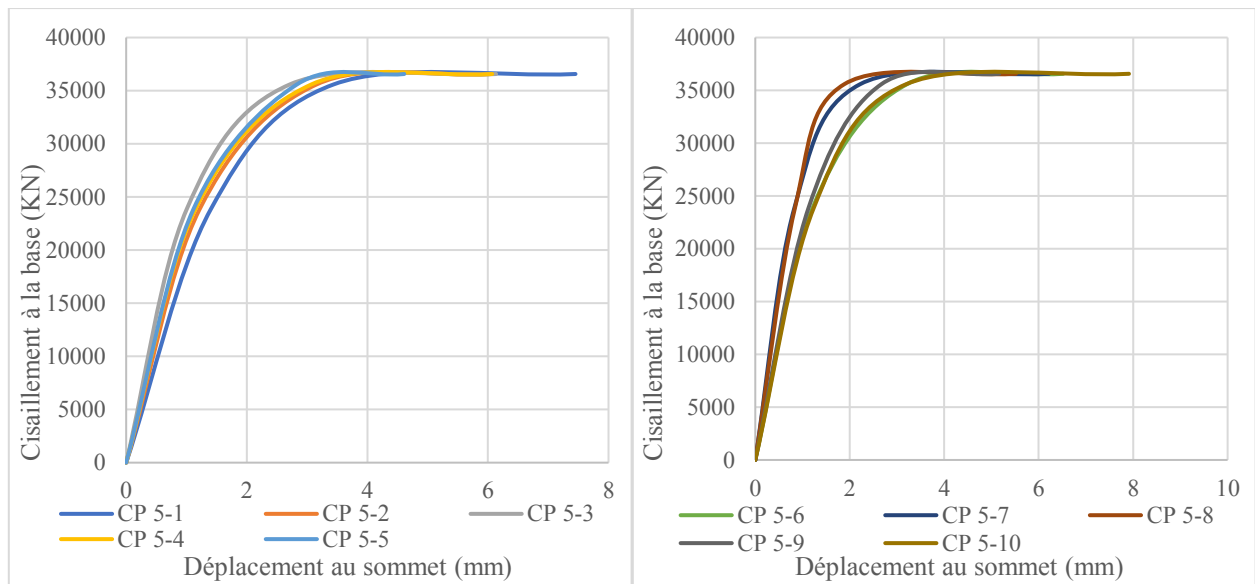


Fig 5.4.34 Résultats de la PA non-linéaire direction +Y : UC 3 (Source : auteur).



a)



b)

Fig 5.4.35 Courbes de capacité direction +Y : UC 3 (Source : auteur)

1) désagrégées (a); 2) agrégées (b))

Direction -Y

Des mécanismes de rupture locaux sont notés aux points de contrôle CP 5-1, CP 5-6, CP 5-8 et CP 5-10 (**Fig 5.4.36**). Les courbes de capacité de tous les CP correspondant à l'UC 3 sont tracées et présentées dans la **Fig 5.4.37**.

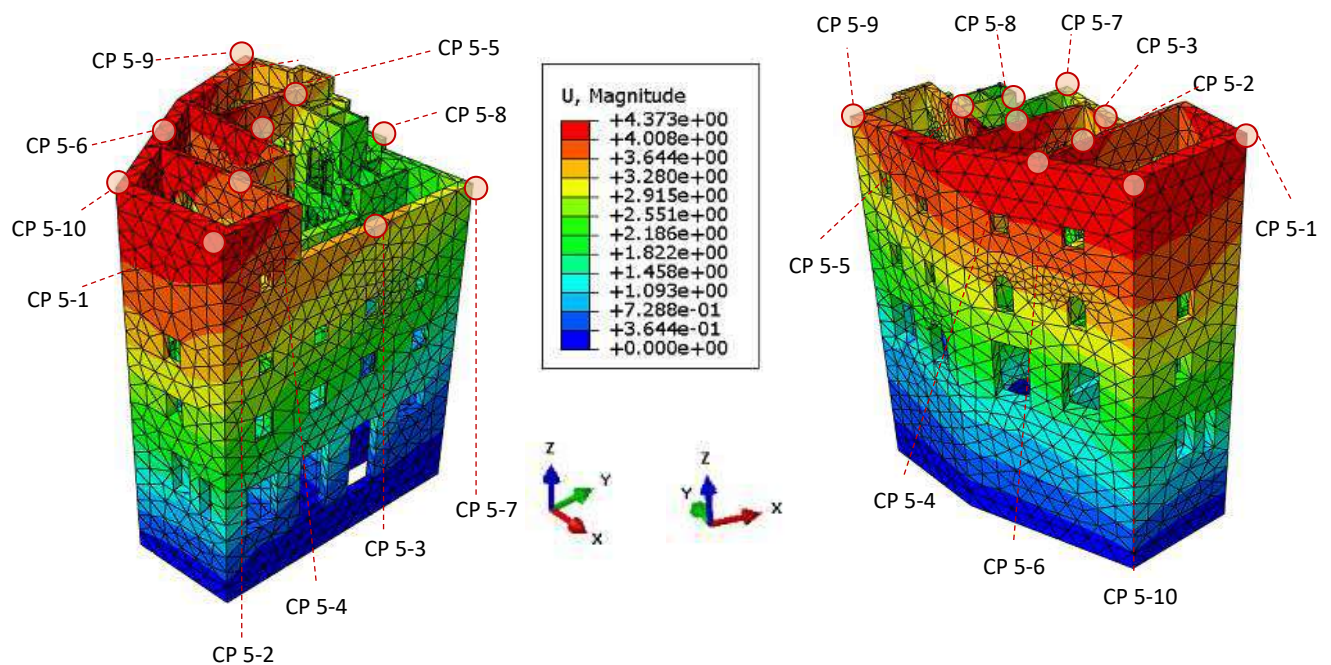
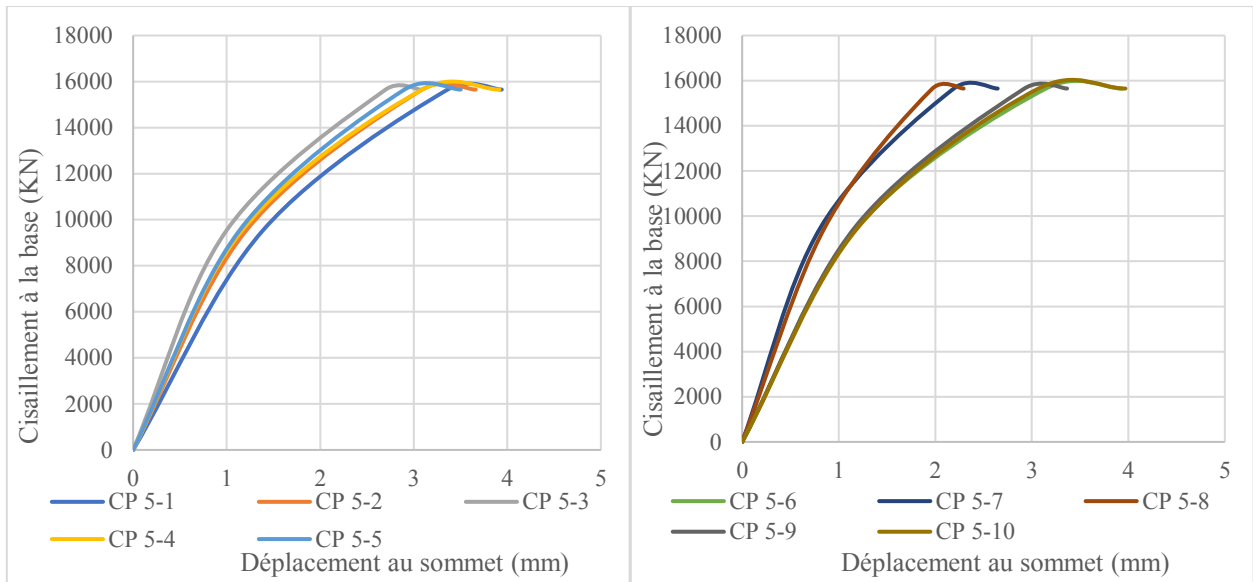
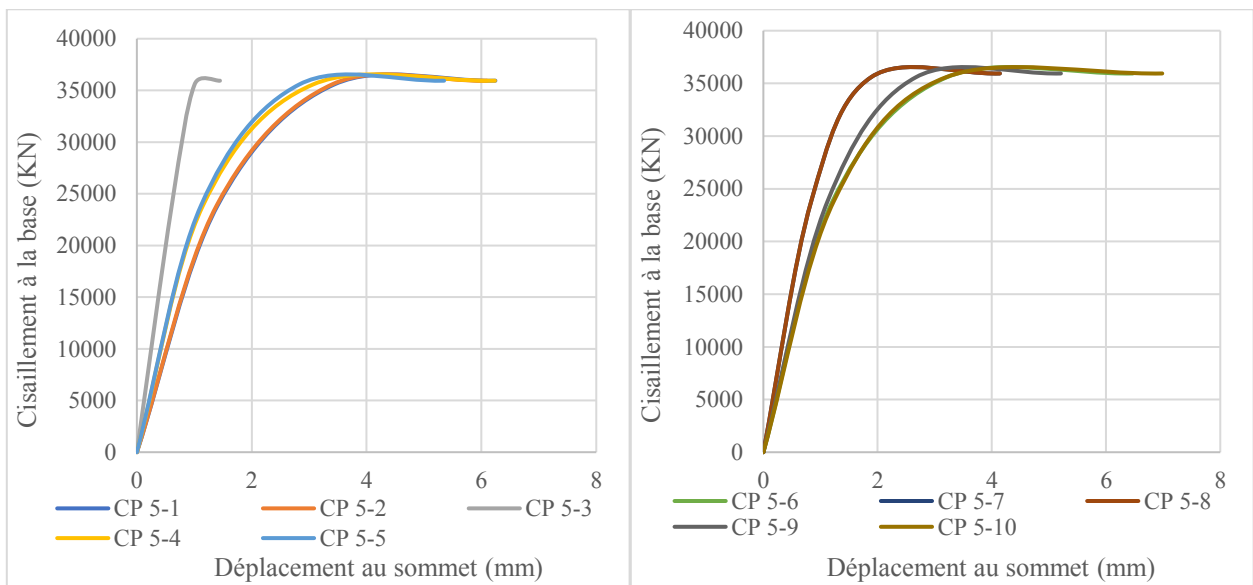


Fig 5.4.36 Résultats de la PA non-linéaire direction -Y : UC 3 (Source : auteur).



a)



b)

Fig 5.4.37 courbes de capacité direction -Y: UC 3 (Source: auteur)

1) désagrégées (a); 2) agrégées (b))

5.4.5.2.4 Unité Constructive (UC) 04

Une application complète des accélérations mentionnées dans le **Tab 5.4.2** a été réalisée sur l'unité construction 04.

Direction + X

On note des mécanismes de rupture locaux correspondant aux points de contrôle CP 1-5 et CP 4-2 (**Fig 5.4.38**). Les courbes de capacité de tous les CP correspondant à l'UC 4 sont tracées et présentées dans la **Fig 5.4.39**.

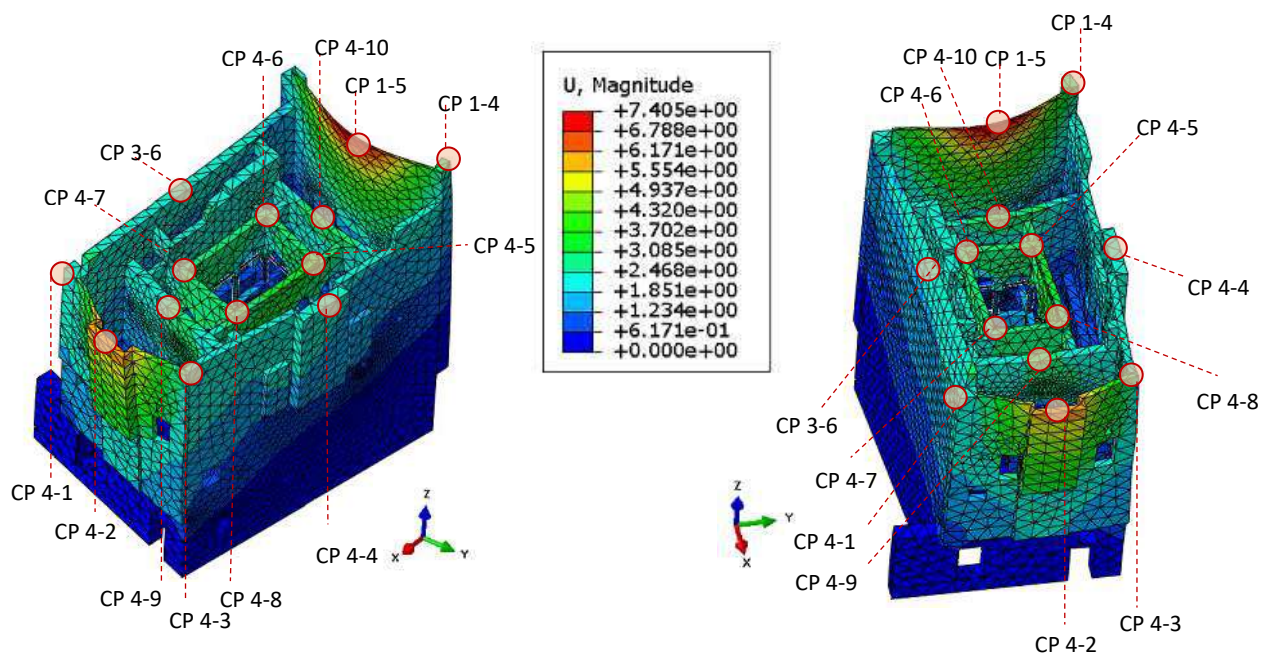
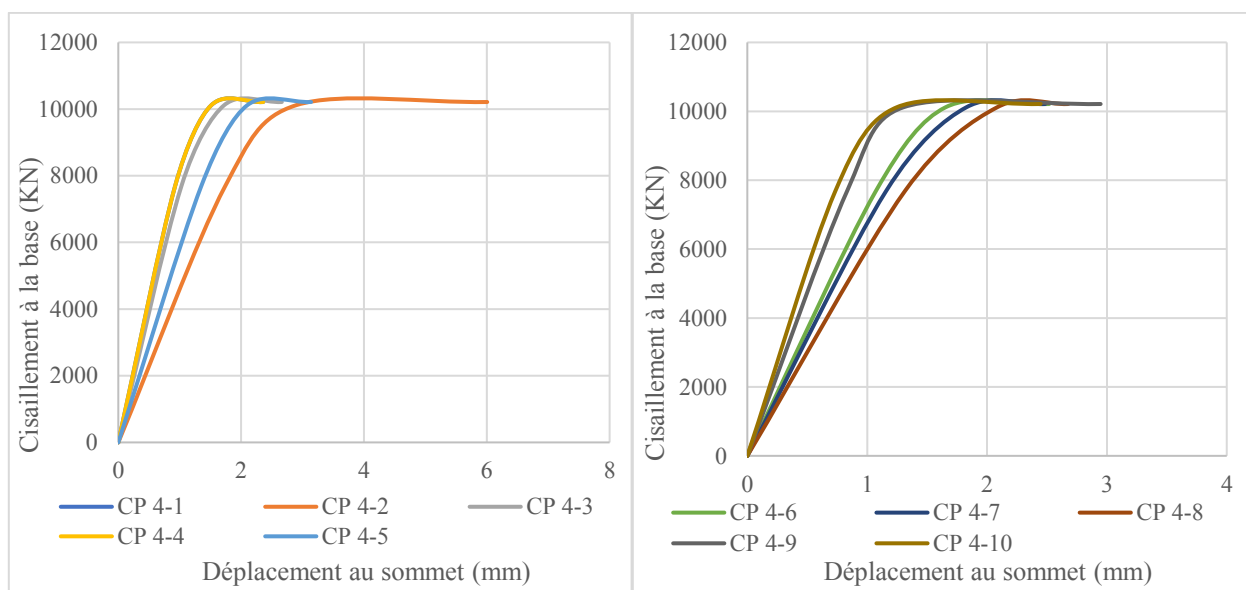
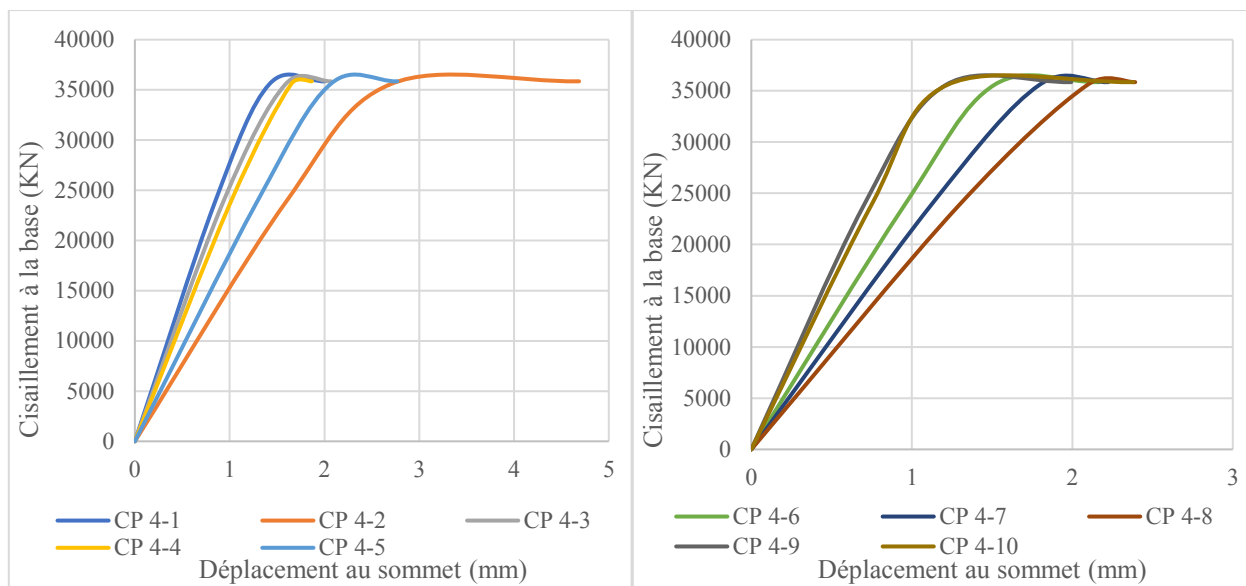


Fig 5.4.38 Résultats de la PA non-linéaire direction +X : UC 4 (Source : auteur).



a)



b)

Fig 5.4.39 courbes de capacité direction +X : UC 4 (Source : auteur)

1) désagrégées (a); 2) agrégées (b))

Direction -X

Un mécanisme de repture local est noté au point de contrôle CP 1-5 (Fig 5.4.40). Les courbes de capacité de tous les CP sont tracées et présentées dans la Fig 5.4.41.

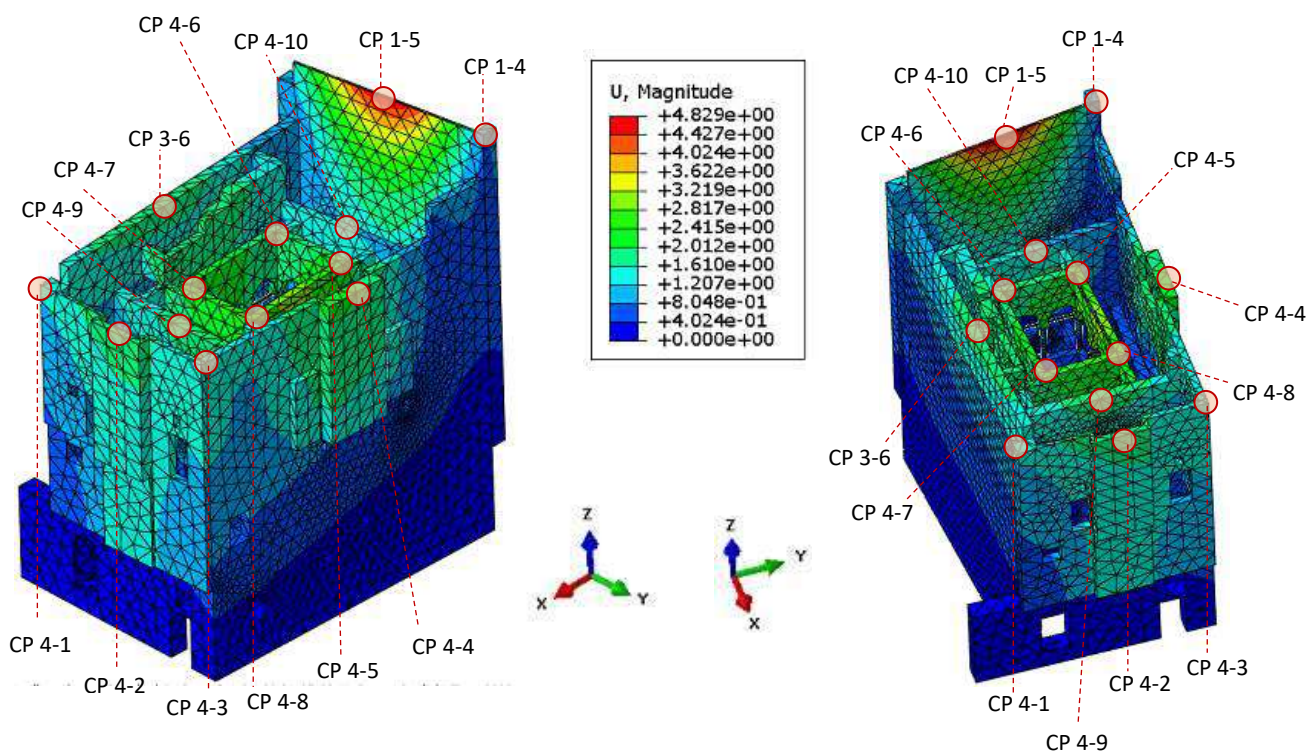
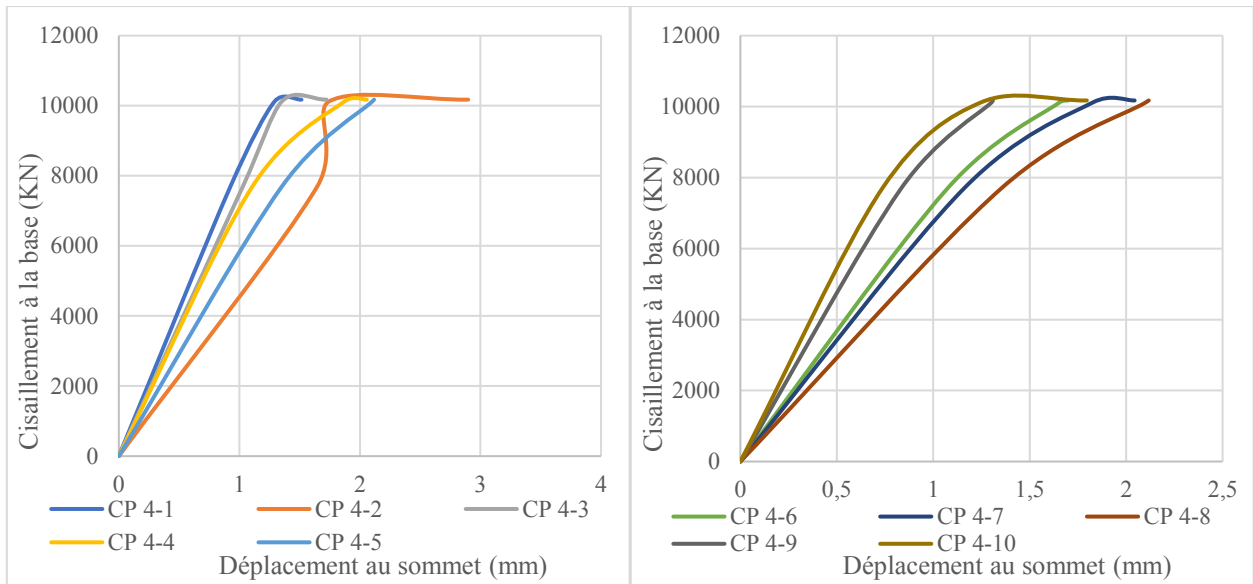
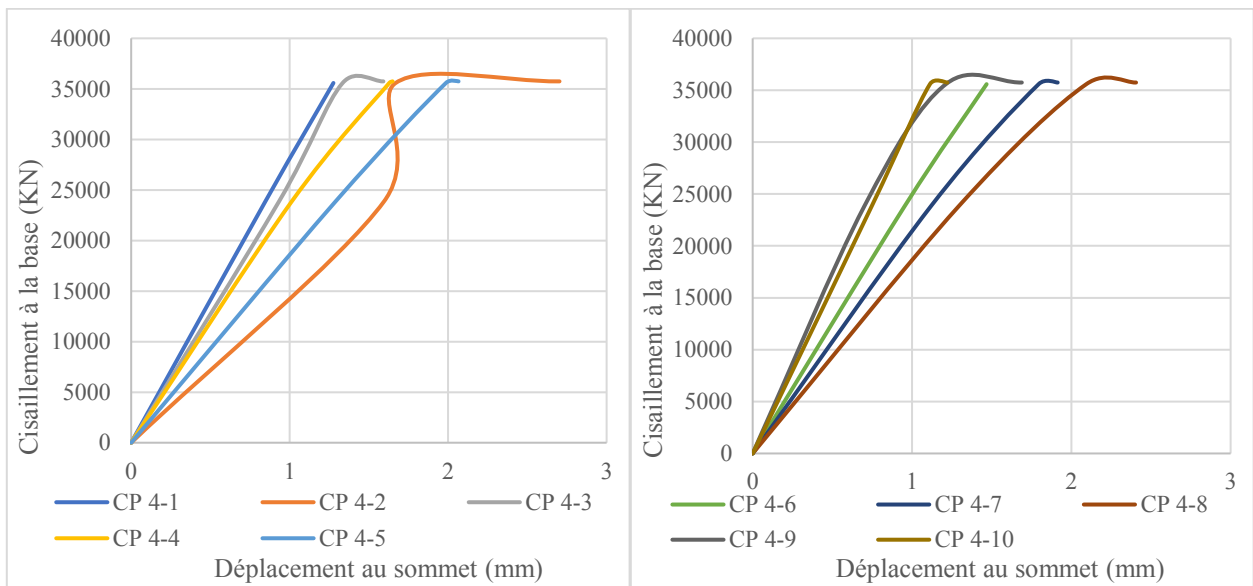


Fig 5.4.40 Résultats de la PA non-linéaire direction -X : UC 4 (Source : auteur).



a)



b)

Fig 5.4.41 courbes de capacité direction -X : UC 4 (Source : auteur)

1) désagrégées (a); 2) agrégées (b)

Direction +Y

Un mécanisme de repture local est noté au point de contrôle CP 4-4 (**Fig 5.4.42**). Les courbes de capacité de tous les points de contrôle de traces et présentées dans la **Fig 5.4.43**.

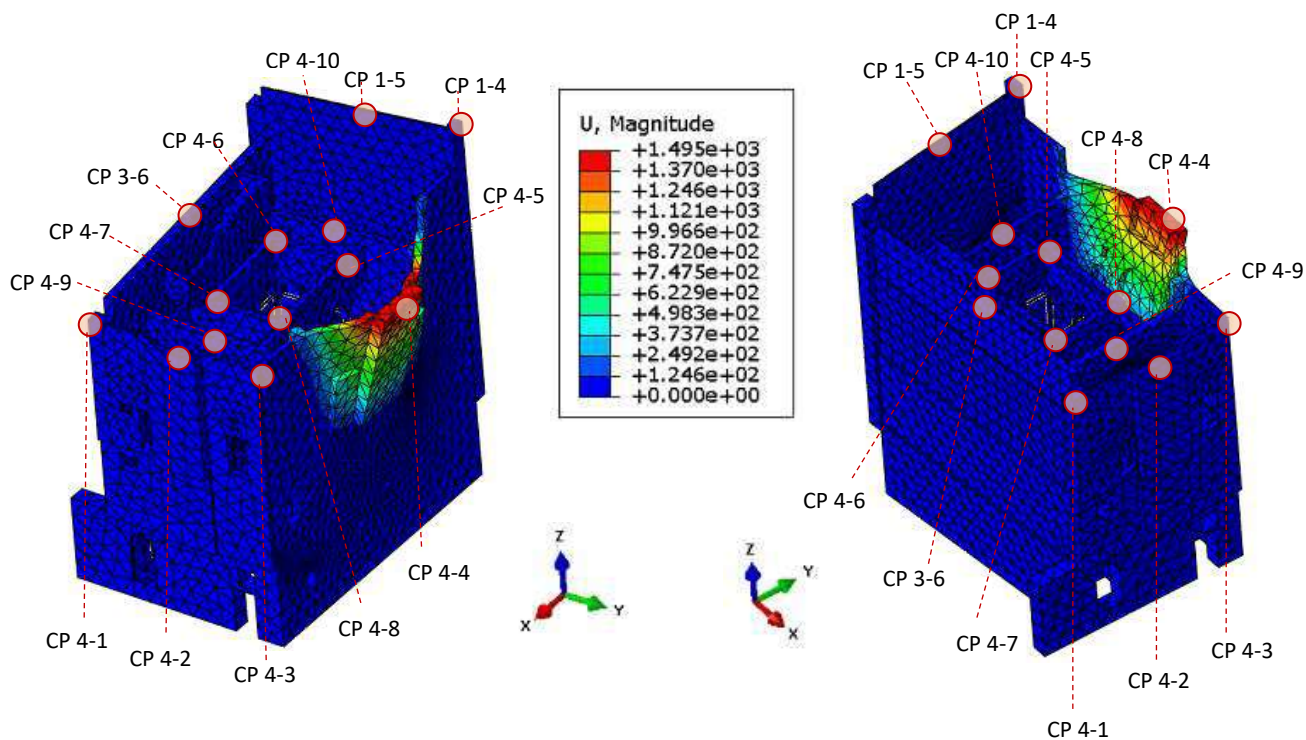
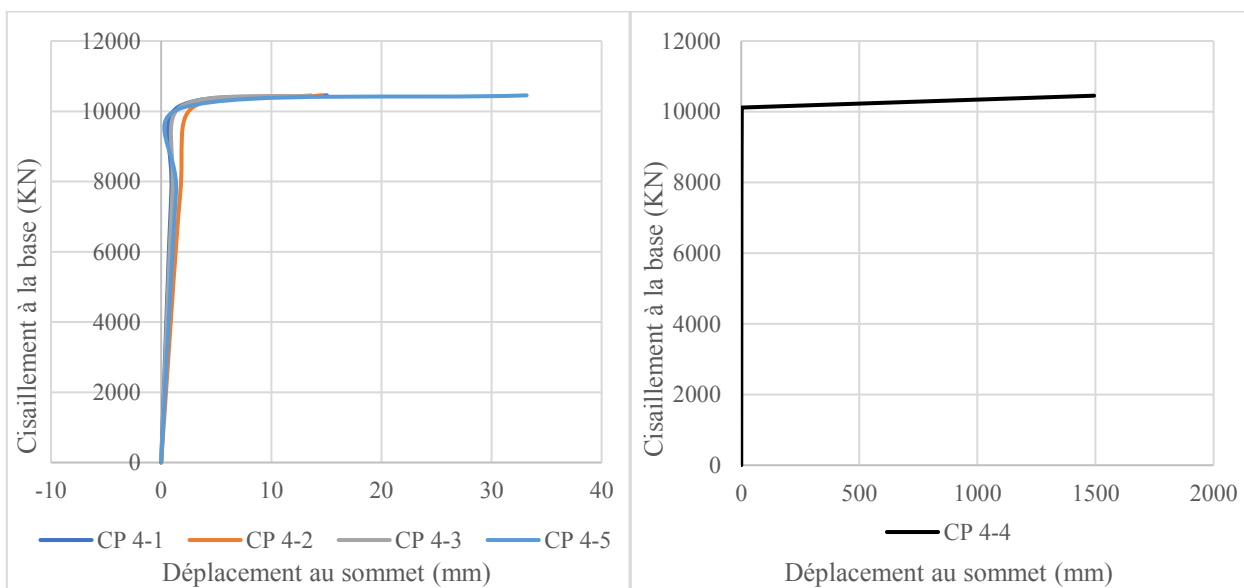
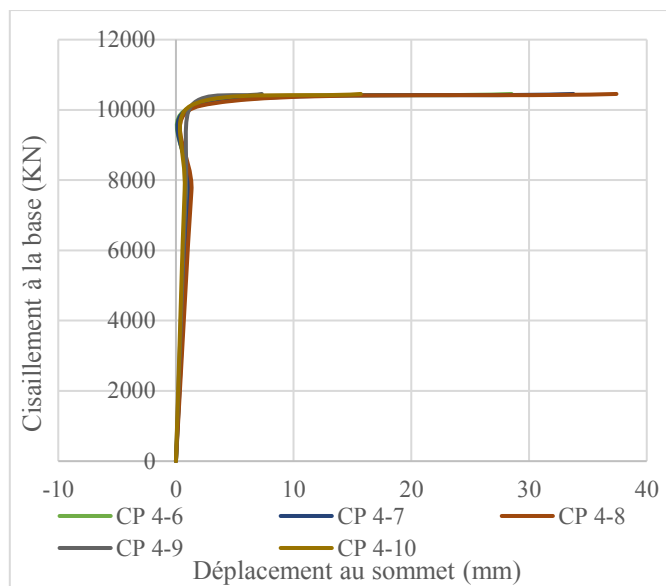
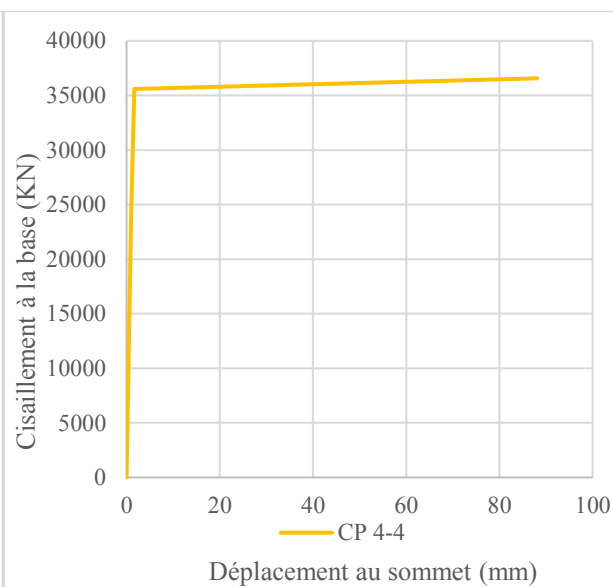
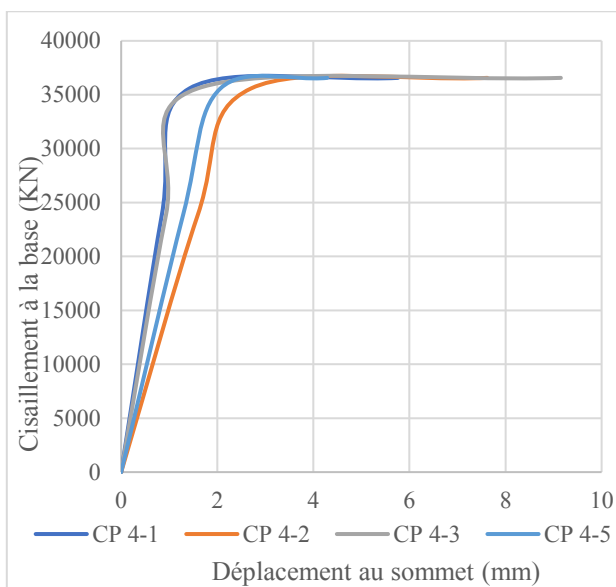


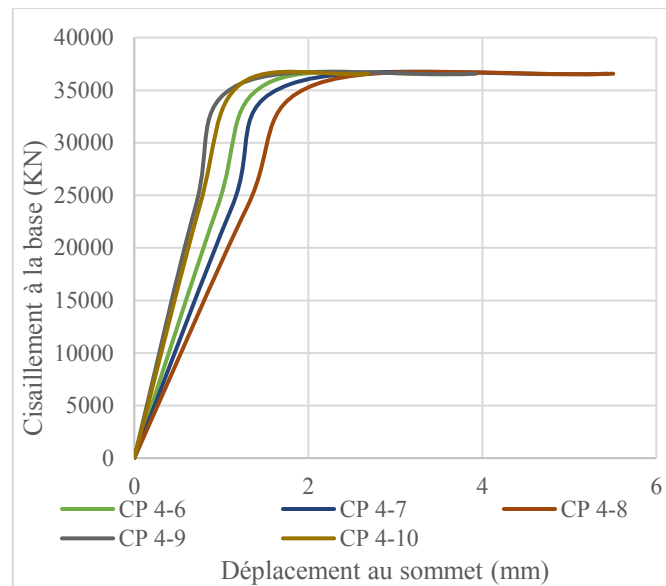
Fig 5.4.42 Résultats de la PA non-linéaire direction +Y : UC 4 (Source : auteur).





a)





b)

Fig 5.4.43 Courbes de capacité direction +Y : UC 4 (Source : auteur)

1) désagrégées (a); 2) agrégées (b)

Direction -Y

Des mécanismes de reptime locaux sont notés correspondant aux points de contrôle CP 4-4 et CP 4-8 (**Fig 5.4.44**). Les courbes de capacité de tous les CP sont tracées et présentées dans la **Fig 5.4.45**.

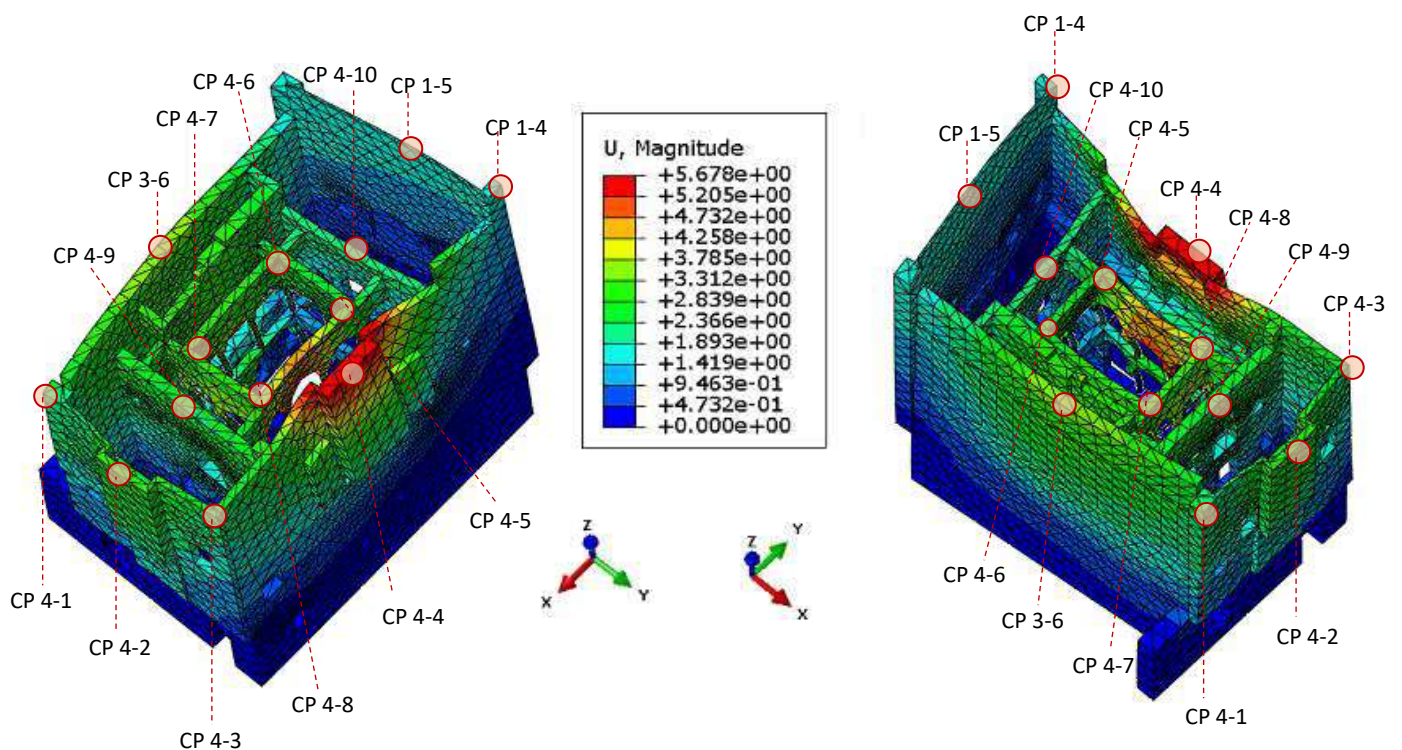
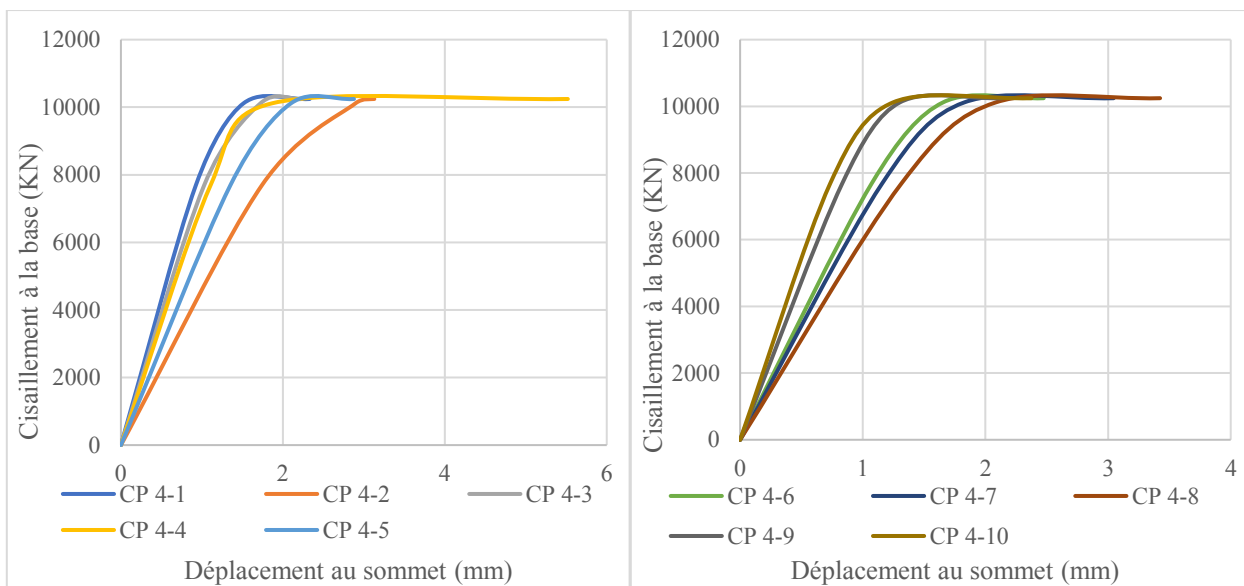
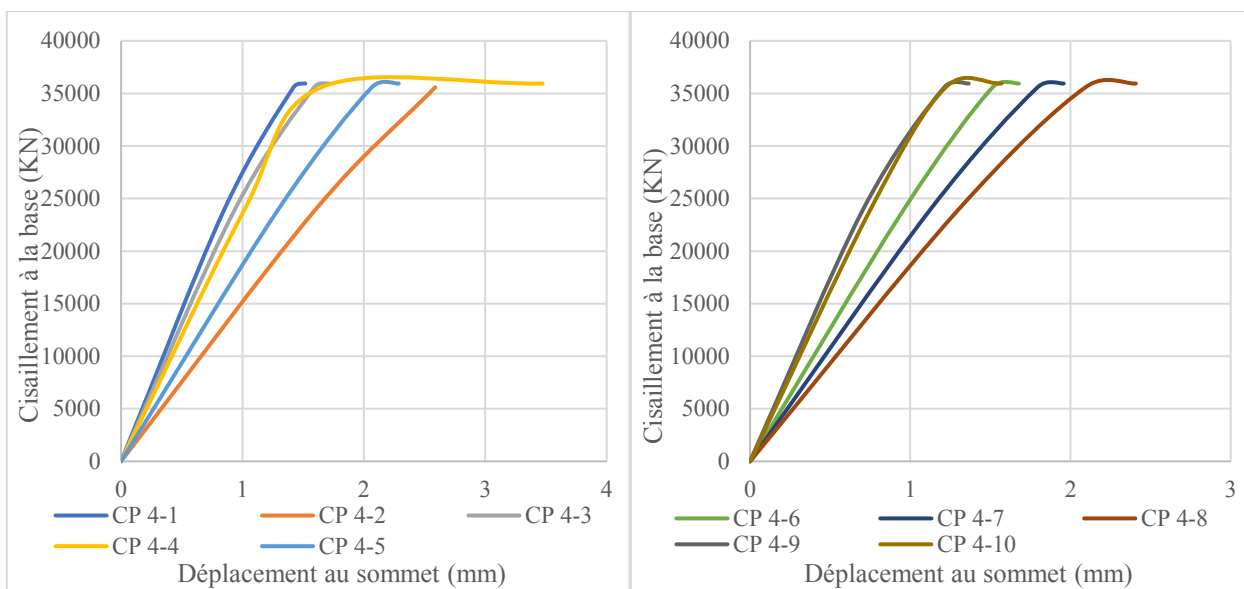


Fig 5.4.44 Résultats de la PA non-linéaire direction -Y : UC 4 (Source : auteur).



a)



b)

Fig 5.4.45 Courbes de capacité direction -Y: UC 4 (Source: auteur)

1) désagrégées (a); 2) agrégées (b)

5.4.5.2.5 Discussion

Unité constructive 1

L'unité constructive 1 est la plus petite de l'agrégat en termes de superficie et de masse avec respectivement 12,7% et 14,7% de la superficie et de la masse totale de l'agrégat. Cette UC riveraine est constituée d'une seule typologie architecturale, à savoir la maison à *Chebbek* ([Section 2.1.3](#)).

L'application de l'analyse PA dans les quatre directions a démontré ce qui suit :

1. Les accélérations horizontales matérialisant la force sismique appliquée à l'agrégat (modèle a) (**Tab 5.4.2**), ont pu être appliquées entièrement à l'UC 1 sans atteindre l'état de rupture du modèle numérique. Ceci a donc permis de comparer le déplacement élastique des différents CP appartenant à l'UC 1 dans son état agrégé et désagrégé.
2. Aucun mécanisme de rupture local n'a été détecté dans la direction +X, ce qui correspond parfaitement à la réponse structurale de l'agrégat dans la même direction. En revanche, le déplacement élastique de l'UC 1 dans son état désagrégé montre une augmentation significative par rapport à son état agrégé avec une variation allant de 33% à 45% pour les 5 CP (**Fig 5.4.46**).

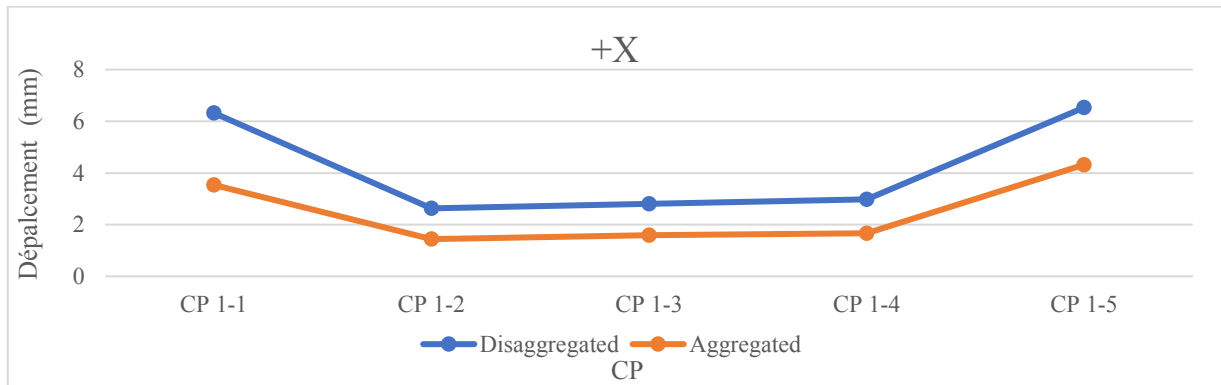


Fig 5.4.46 Comparaison du déplacement au sommet : UC 1 direction +X (Source : auteur)

3. Début de formation d'un mécanisme de rupture local dans la direction -X matérialisé par un hors plan de la façade par flexion horizontale au CP 1-1. Le déplacement élastique de l'UC 1 dans son état désagrégé montre une augmentation significative par rapport à son état agrégé avec une variation allant de 37% à 45% pour les 5 CP (**Fig 5.4.47**).

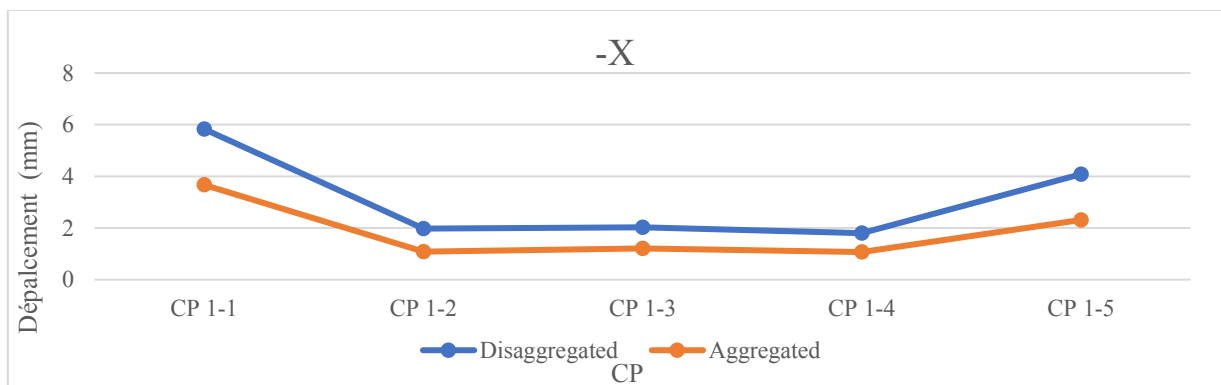


Fig 5.4.47 comparaison du déplacement au sommet : UC 1 direction -X (Source : auteur)

4. Début de formation d'un mécanisme de repture local dans le sens + Y qui se matérialise par un hors-plan de la façade par flexion horizontale au CP 1-1, CP 1-3 et CP 2-3. Le mécanisme de repture détecté au CP 1-1 appartenant à la façade nord de l'UC est formé du fait de la réduction de l'épaisseur de la paroi au 2^{ème} étage (360 mm) et au niveau du garde-corps (100 mm) au lieu de 600 mm au rez-de-chaussée ainsi qu'une forte force de compression générée par les deux murs qui lui sont perpendiculaires. En revanche, le déplacement élastique de l'UC 1 dans son état désagrégé montre une augmentation significative par rapport à son état agrégé avec une variation allant de 26% à 39% pour les 5 CP (Fig 5.4.48).

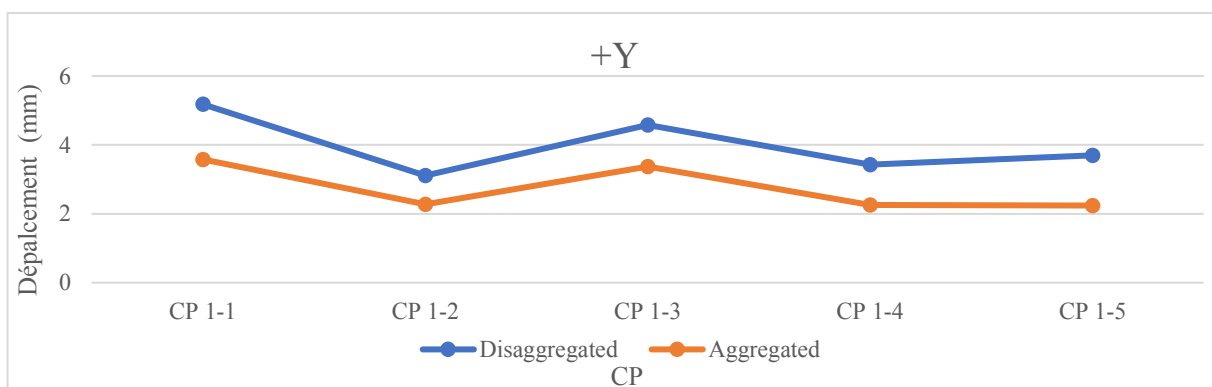


Fig 5.4.48 Comparaison du déplacement au sommet : UC 1 direction +Y (Source : auteur)

5. Début de formation d'un mécanisme de repture local dans la direction -Y matérialisé par un hors plan de la façade par flexion horizontale au niveau du CP 1-1. Le mécanisme de défaillance détecté au niveau de ce dernier est dû aux mêmes raisons énoncées dans le sens + Y. En revanche, le déplacement élastique de l'UC 1 dans son état désagrégé montre une augmentation par rapport à son état agrégé avec une variation allant de 7% à 13% pour les 5 CP (Fig 5.4.49).

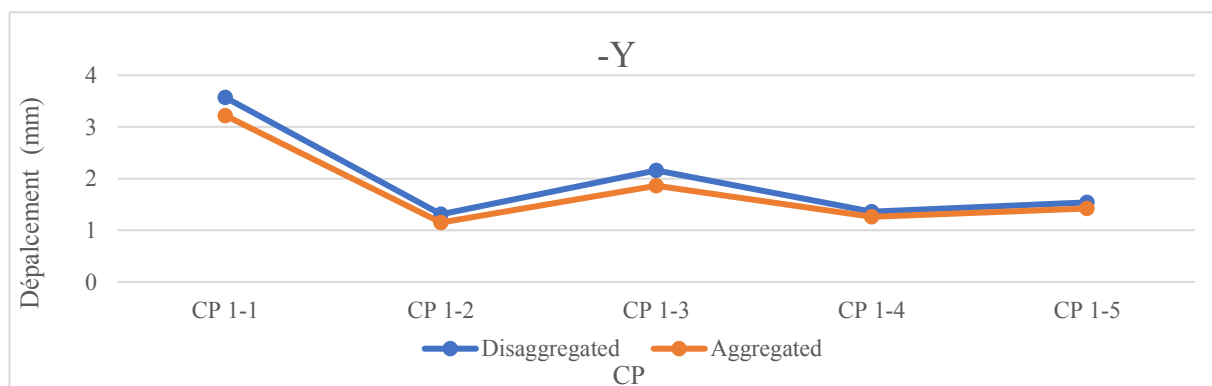


Fig 5.4.49 Comparaison du déplacement au sommet : UC 1 direction -Y (Source : auteur)

Unité Constructive 2

L'unité constructive 2 occupe la partie centrale de l'agrégat avec une surface et une masse de 24% et 28% respectivement de la surface et la masse totale de l'agrégat. Elle est composée de deux typologies architecturales, à savoir la maison avec *Chebbek* et la maison avec patio ([Section 2.1.3](#)).

L'application de la PA dans les quatre directions a démontré ce qui suit:

- 1- Les accélérations horizontales matérialisant la force sismique appliquée à l'agrégat (modèle a) ([Tab 5.4.2](#)), ont pu être appliquées entièrement à l'UC 2 sans atteindre l'état de rupture du modèle numérique. Ceci a donc permis de comparer le déplacement élastique des différents CP appartenant à l'UC 2 dans son état agrégé et désagrégé.
- 2- Début de formation d'un mécanisme de rupture local dans la direction +X qui se matérialise par un hors plan de la façade par flexion horizontale au niveau du CP 2-1 et CP 2-5. En revanche, le déplacement élastique de l'UC 2 dans son état désagrégé montre une augmentation par rapport à son état agrégé avec une variation allant de 3% à 11% pour 5 CP et une réduction de 1% à 33% pour 6 CP ([Fig 5.4.50](#)).

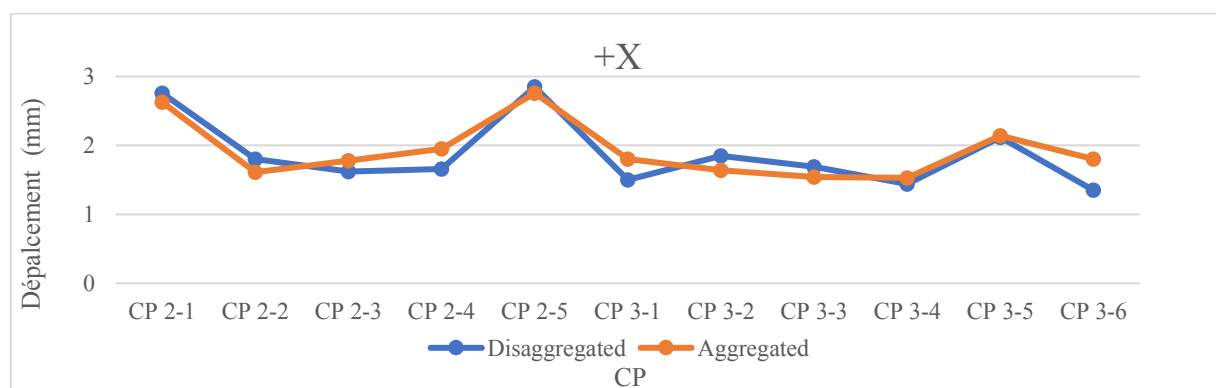


Fig 5.4.50 Comparaison du déplacement au sommet : UC 2 direction +X (Source : auteur)

- 3- Formation d'un mécanisme de rupture local dans la direction -X qui se matérialise par un hors-plan de la façade par renversement composé au niveau du CP 2-1 appartenant à la façade nord principale. On note également le début de formation d'un autre mécanisme de rupture local matérialisé par un hors plan de la façade sud par flexion horizontale au niveau du CP 2-5.
En revanche, le déplacement élastique de l'UC 2 dans son état désagrégé montre une augmentation significative par rapport à son état agrégé avec une variation allant de 9% à 47% pour 10 CP et une réduction de 2% pour le CP 3-1 ([Fig 5.4.51](#)).

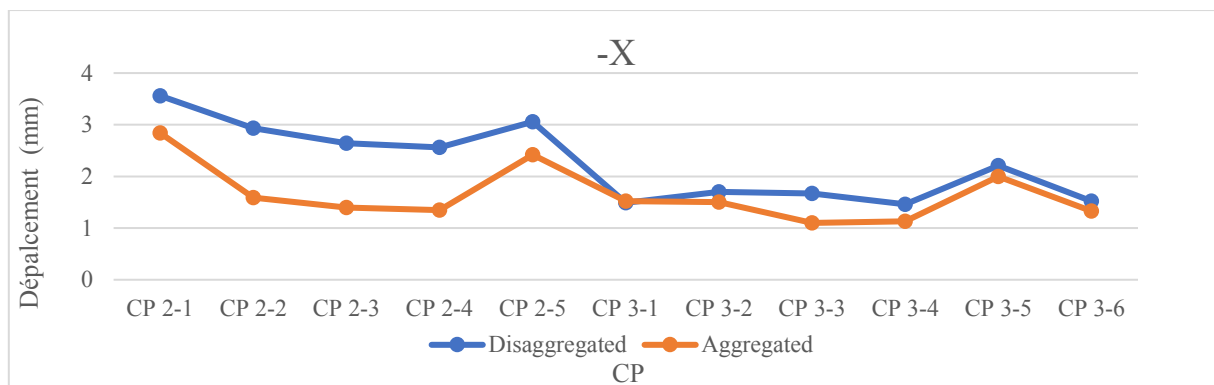


Fig 5.4.51 Comparaison du déplacement au sommet : UC 2 direction -X (Source : auteur)

- 4- Formation d'un mécanisme de repture local dans la direction +Y qui se matérialise par un hors plan de la façade par flexion horizontale au niveau du CP 2-3. On note également le début de formation du même mécanisme au niveau du CP 5-8. En revanche, le déplacement élastique de l'UC 2 dans son état désagrégé montre une augmentation significative par rapport à son état agrégé avec une variation allant de 21% à 85% pour les 11 CP (**Fig 5.4.52**).

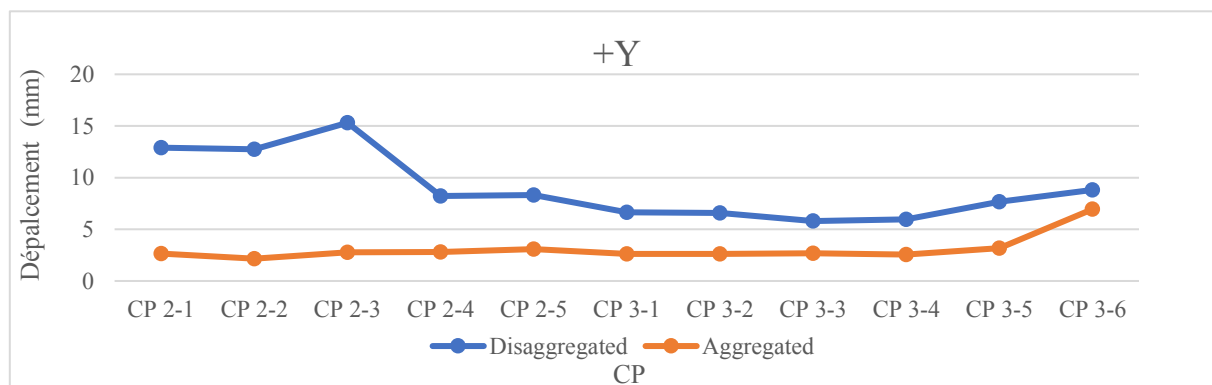


Fig 5.4.52 Comparaison du déplacement au sommet : UC 2 direction +Y (Source : auteur)

- 5- Formation d'un mécanisme de rupture local dans la direction -Y qui se matérialise par un hors-plan de la façade par flexion horizontale au niveau des CP 2-3 et 5-8. En revanche, le déplacement élastique de l'UC 2 dans son état désagrégé montre une augmentation par rapport à son état agrégé avec une variation allant de 32% à 69% pour les 11 CP (**Fig 5.4.53**).

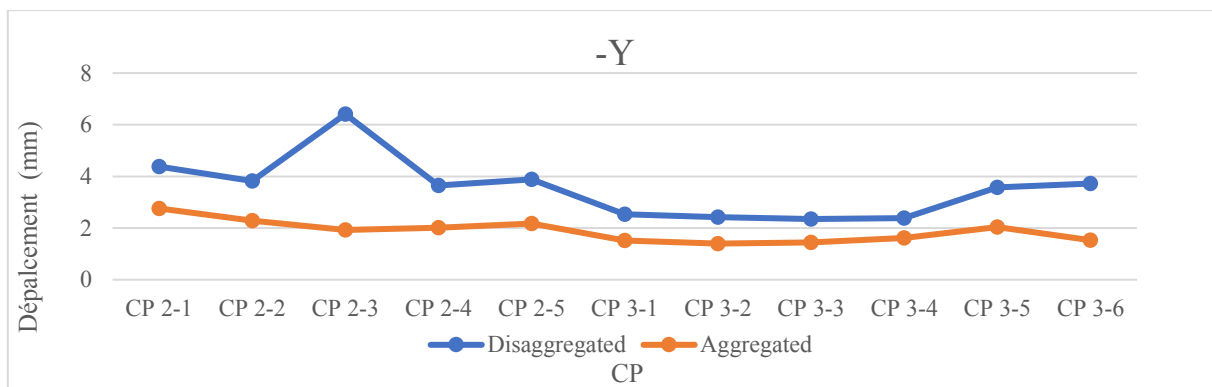


Fig 5.4.53 Comparaison du déplacement au sommet: UC 2 direction -Y (Source: auteur)

Unité constructive 3

L'unité de construction 3 est la plus grande de l'agrégat en termes de superficie et de masse avec respectivement 34% et 40% de la superficie et de la masse totale de l'agrégat. Cette UC de rive est constituée d'une seule typologie architecturale, à savoir la maison avec patio ([Section 2.1.3](#)).

L'application de la PA dans les quatre directions a démontré ce qui suit:

1. La UC 3 a montré une vulnérabilité bien plus grande que toutes les autres UC. En effet, le modèle numérique a atteint son état de non-convergence avant l'application complète des accélérations prévues pour l'agrégat (modèle a). Nous avons enregistré une réduction de 20,4%, 43,7%, 43,7% et 62,5% respectivement dans les quatre directions + X, -X, + Y et -Y.
2. Des mécanismes de défaillance locaux ont été enregistrés dans la direction + X matérialisés par :
 - a. Un hors plan de la façade par flexion horizontale au niveau du CP 5-3.
 - b. Un hors-plan de la façade par renversement composé au niveau du CP 5-1.
 Ces mécanismes de défaillance locaux correspondent parfaitement à la réponse structurale de l'agrégat dans la même direction.
3. Des mécanismes de défaillance locaux ont été enregistrés dans la direction -X matérialisés par :
 - a. Un hors plan de la façade par flexion horizontale au CP 5-4.
 - b. Un hors-plan de la façade par renversement composé aux CP 5-10, CP 5-5, CP 5-8 et CP 5-9.
 On enregistre donc l'émergence de deux nouveaux mécanismes de défaillance locaux à l'UC 3 dans son état désagrégé : le premier dans l'un des murs intérieurs transversaux et le second au niveau de la façade Est.

4. Les mécanismes de défaillance locaux ont été enregistrés dans le sens + Y matérialisés par:
 - a. Un hors plan de la façade par flexion horizontale au niveau du CP 5-3.
 - b. Un hors-plan de la façade par renversement composé au niveau des CP 5-6, et CP 5-10.

Ces mécanismes de défaillance locaux correspondent parfaitement à la réponse structurelle de l'agrégat dans le même sens.

5. Un hors-plan de la façade par renversement composé est enregistré dans la direction -Y aux CP 5-1 et CP 4-10 dont ils reflètent parfaitement la réponse structurelle de l'agrégat dans la même direction.

Unité Constructive 4

L'unité Constructive 4 est la deuxième plus grande de l'agrégat en termes de superficie et de masse représentant 32% de la superficie et la masse totale de l'agrégat. Cette UC riveraine est constituée d'une seule typologie architecturale, à savoir la maison à patio ([Section 2.1.3](#)).

L'application de la PA dans les quatre directions a démontré ce qui suit :

- 1- Les accélérations horizontales matérialisant la force sismique appliquée à l'agrégat (modèle a) ([Tab 5.4.2](#)), ont pu être appliquées entièrement à l'UC 4 sans atteindre l'état de rupture du modèle numérique. Ceci a donc permis de comparer le déplacement élastique des différents CP appartenant à l'UC 4 dans son état agrégé et désagrégé.
- 2- Début de formation d'un mécanisme de rupture local dans le sens +X qui se matérialise par un hors plan de la façade par flexion horizontale au niveau du CP 5-1 et CP 4-2. En revanche, le déplacement élastique de l'UC 4 dans son état désagrégé montre une augmentation significative par rapport à son état agrégé avec une variation allant de 2% à 32% pour les 10 CP ([Fig 5.4.54](#)).

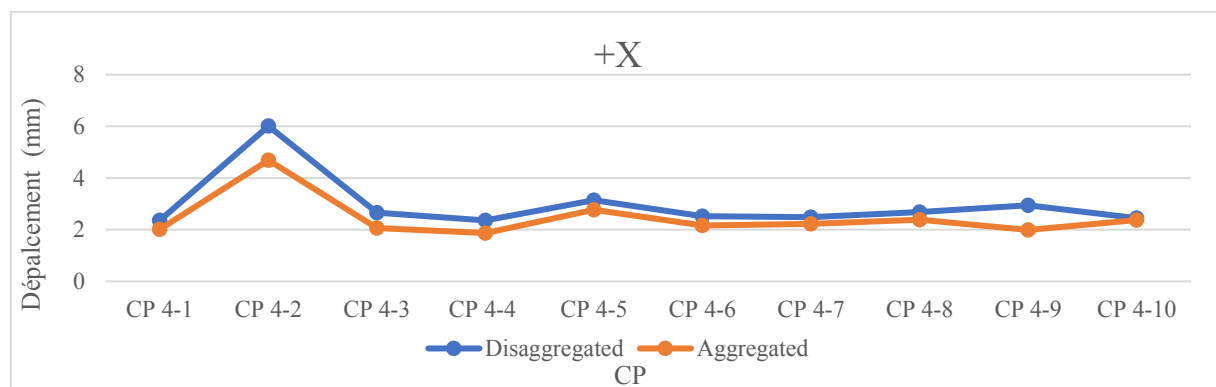


Fig 5.4.54 Comparaison du déplacement au sommet : UC 4 direction +X (Source v: auteur)

- 3- Début de formation d'un mécanisme de rupture local dans la direction -X qui matérialise par un hors-plan de la façade par flexion horizontale au niveau de CP 1-5. En revanche, le déplacement élastique de l'UC 4 dans son état désagrégé montre une augmentation par

rapport à son état agrégé avec une variation allant de 2% à 32% pour 8 CP et une réduction de 13% et 29% respectivement au CP 4- 8 et CP 4-9 (Fig 5.4.55).

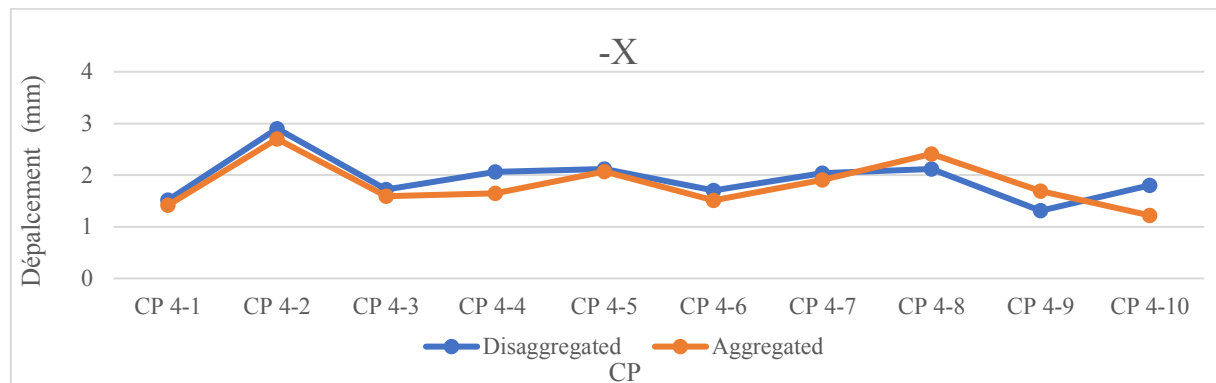


Fig 5.4.55 Comparaison du déplacement au sommet : UC 4 direction -X (Source : auteur)

- 4- On note la formation d'un mécanisme de rupture local dans le sens + Y matérialisé par un hors-plan de la façade par flexion horizontale au niveau CP 4-4, dont il correspond parfaitement à la réponse structurale de l'agrégat dans la même direction. L'apparition de ce mécanisme peut être justifiée par la présence de porte-à-faux (un encorbellement) au niveau du même CP, ce qui représente une masse importante localisée au niveau supérieur de la façade Est. De plus, les murs perpendiculaires à la même façade sont distants de 7 m. En revanche, le déplacement élastique de l'UC 4 dans son état désagrégé montre une augmentation significative par rapport à son état agrégé avec une variation allant de 23% à 94% pour les 10 PC (Fig 5.4.56).

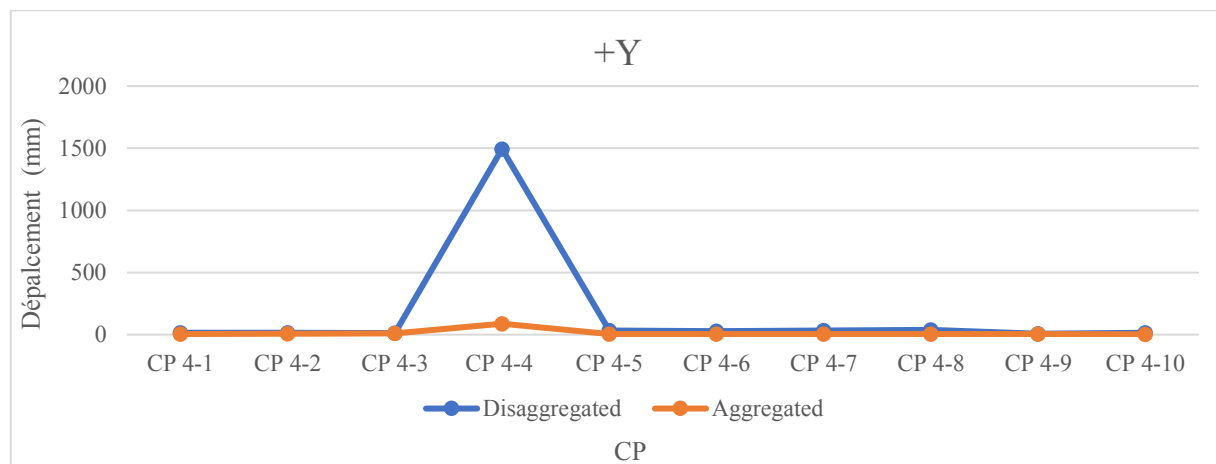


Fig 5.4.56 Comparaison du déplacement au sommet : UC 4 direction +Y (Source : auteur)

- 5- La formation d'un mécanisme de rupture local dans la direction -Y qui se matérialise par un hors-plan de la façade par flexion horizontale au niveau du CP 4-4 pour les mêmes raisons évoquées pour la direction + Y. Aussi, le début d'apparition d'un autre mécanisme de rupture est noté au niveau de l'arcade entourant le patio entre le CP 4-5 et le CP 4-8 (Fig 5.4.57). Le déplacement élastique de l'UC 4 dans son état désagrégé montre une

augmentation significative par rapport à son état agrégé avec une variation allant de 13% à 37% pour les 10 CP (Fig 5.4.58).

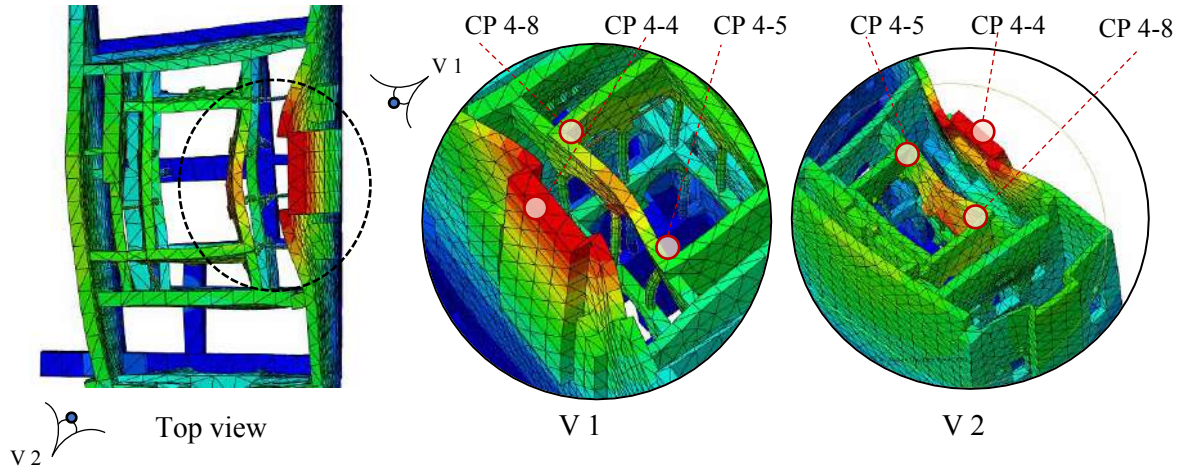


Fig 5.4.57 Mécanisme de rupture local : UC 4 direction -Y (Source : auteur)

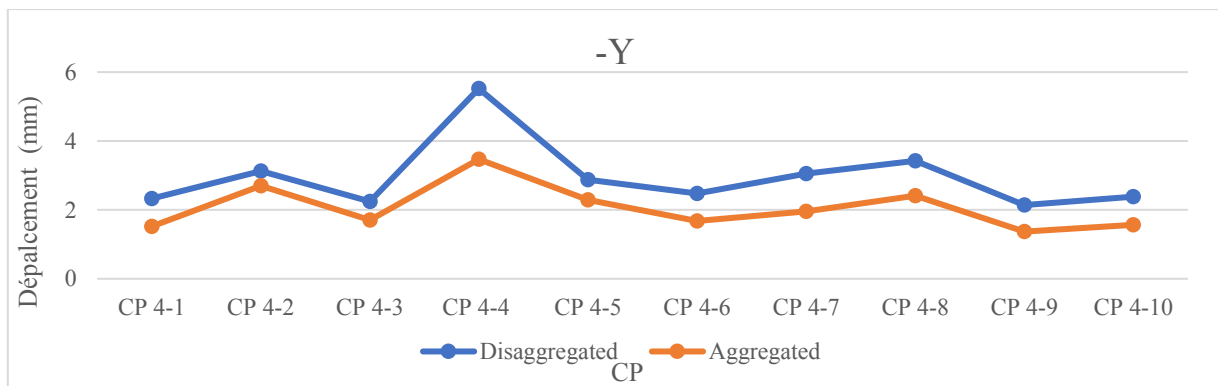


Fig 5.4.58 Comparaison du déplacement au sommet : UC 4 direction -Y (Source : auteur)

5.4.5.2.6 Conclusion

Dans cette section, nous avons présenté les résultats de l'analyse Pushover appliquée aux quatre unités constructives.

Afin de réaliser une analyse comparative des déplacements élastiques des différents CP des quatre UC dans leur état agrégé et désagrégé, nous nous sommes d'abord référés aux accélérations horizontales appliquées à l'agrégat (modèle a) (Tab 5.4.2). En effet, les résultats montrent que l'UC 3 représentant la maison 5 est la plus vulnérable de l'agrégat puisque le modèle numérique atteint l'état de non-convergence avant l'application totale des accélérations et avec une réduction de la performance structurale de 62,5% dans la direction -X. Ce résultat n'est pas fortuit puisque l'analyse Pushover appliquée au modèle (a) de l'agrégat a mis en évidence une concentration de

mécanismes de défaillance locaux au niveau de la maison 5, c'est-à-dire l'UC 3 (Section 5.4.5.1.1). Les trois autres UC (CU1, CU2 et CU4) ont une meilleure réponse structurale puisque les accélérations horizontales ont pu être appliquées entièrement sans atteindre l'état de non-convergences des modèles numériques.

La désagrégation de l'agrégat en quatre CUs structurellement indépendantes a révélé de nombreux mécanismes de rupture locaux sous l'effet d'accélérations sismiques qui se manifestent par un hors plan des parois par flexion horizontale ou par retournement composé. Ces mécanismes ont été considérablement réduits à l'état agrégé des maisons, ceci d'une part.

D'autre part, toutes les UC ont démontré une plus grande vulnérabilité sismique dans leur état désagrégé à travers l'évaluation des courbes de capacité de tous les CP sélectionnés dans les différentes directions. En effet, les déplacements élastiques sont réduits en moyenne de 30% dans toutes les directions confondues pour les trois UC (CU 1, CU2 et CU 4). Cependant, les maisons de la Casbah d'Alger sont moins vulnérables aux tremblements de terre au sein d'un agrégat.

La vulnérabilité sismique des maisons de la Casbah d'Alger au-delà de leur configuration agrégée dépend également de leurs typologies structurales et architecturales (géométrie, dimensions, taille, répartition des masses, régularité en plan et façade, positionnement des ouvertures, etc.), ainsi que leur position dans l'agrégat: centre ou extrémité. Les principaux mécanismes de rupture sont concentrés aux extrémités de l'agrégat, c'est-à-dire principalement la maison de rive 5 (CU 3) suivie de la maison 4 (CU 4). Ce résultat correspond parfaitement aux lignes directrices qui intègrent les indications relatives aux mécanismes d'endommagement des agrégats développés par divers auteurs tels que (Giuffrè, 1993), (Bertocchi, et al., 2000) et (Cardani, 2003) (Fig 5.4.59).

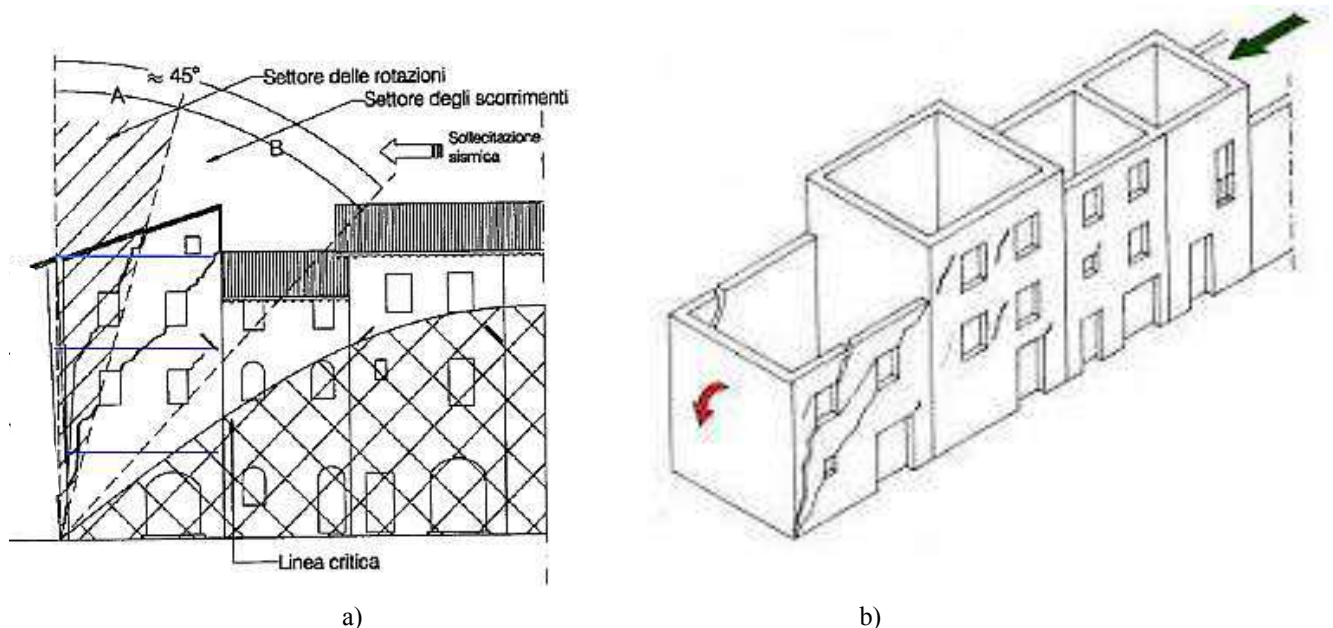


Fig 5.4.59 Endommagement des agrégats historiques sous l'action sismique.

- a) Schématisation des forces sismiques agissant sur les unités angulaires (extrémités) (Source : (Giuffrè, 1993))
- b) Schéma représentatif de l'endommagement de l'unité angulaire d'un agrégat sous l'action sismique agissant dans son plan (Source: (Cardani, 2003))

Enfin, les maisons de rive (4 et 5) nécessitent une attention particulière lors des actions de réhabilitation et de mise à niveau structurelle afin d'améliorer le comportement structurel général de l'agrégat et de réduire sa vulnérabilité sismique.

5.5 Conclusion

Le processus de modélisation architecturale permettant le passage d'un nuage de point à un modèle structurel HBIM de l'agrégat avec un haut degré de précision est une étape d'une très grande importance. En effet, le modèle obtenu a permis de reproduire de la manière la plus correcte possible la complexité géométrique de cette Architecture Vernaculaire permettant ainsi une simulation structurelle plus correcte et précise.

La simulation structurelle et numérique d'un agrégat historique en maçonnerie est une tâche très difficile et complexe d'où le manque profond de travaux similaires dans la littérature. Cette difficulté réside principalement dans : 1) l'obtention d'un correct et cohérent maillage 3D par éléments finis, 2) la paramétrisation du modèle structurel et 3) un temps de calcul important nécessitant un hardware extrêmement performant.

L'Analyse Linéaire Statique représente une première étape de la simulation structurelle de l'agrégat qui a démontré une bonne stabilité générale de celui-ci. Elle a permis de localiser tout d'abord les parties structurelles les plus vulnérables des maisons sous un chargement statique, et de constituer une référence importante pour l'analyse sismique Pushover à travers la sélection des Points de Contrôle.

L'analyse sismique Pushover est une méthode intéressante, envisageable et avantageuse pour évaluer les performances structurelles à l'état sismique des Constructions historiques en maçonnerie complexes (Architectures Vernaculaires, les édifices de culte, châteaux...) recommandés par divers auteurs. En effet, son principal avantage réside dans

son exécution simplifiée par rapport aux analyses dynamiques traditionnelles permettant d'estimer les performances structurelles à l'état sismique des constructions à l'échelle Macro (déplacement cible) et de localiser les parties les plus vulnérables mais aussi de décrire le mode de rupture dominant.

Les résultats de l'analyse Pushover ont démontré une bonne réponse structurelle générale de l'agrégat au séisme ce qui constitue une réponse partielle à la problématique émise en amont de la thèse.

En outre, l'agrégat a mis en exergue des modes de rupture locaux plutôt que globaux en parfaite conformité avec les formes de déformation obtenus à travers l'analyse Modale, ceci correspond parfaitement à un comportement typique des structures historiques en maçonnerie. Des interventions de réhabilitation structurelle localisées et ciblées sont donc recommandées.

La désagrégation de l'agrégat a constitué une étape très intéressante qui a permis de lever le voile sur la question relative aux performances structurelles des maisons dans leurs états agrégés ou désagrégés. En effet, les maisons de la Casbah d'Alger ont une meilleure réponse structurelle au séisme et sont moins vulnérables au sein d'un agrégat. Ceci constitue une référence importante lors des travaux de réhabilitation structurelle qui doivent privilégier les actions menées à l'échelle Macro (agrégat) plutôt que Micro (maisons).

Nous présentons dans le dernier chapitre de la thèse, les propositions d'interventions structurelles en se référant aux critères stipulés dans chartes internationales de restauration ainsi que les recommandations d'intervention structurelle développées tout le long de ce chapitre.

Chapitre 6

Proposition d'intervention structurelle

6.0 Introduction Générale

L'intervention sur le patrimoine architectural bâti est une tâche complexe et délicate. Elle nécessite la collaboration de plusieurs acteurs pluridisciplinaires (architecte, ingénieur, métreur, restaurateur ...) qui permettront d'approcher le patrimoine bâti sous différents angles en traitant tous ses aspects constitutifs (contexte urbain, architecture, structure, archéologie du bâtiment, histoire, sociologie...).

Néanmoins, une intervention structurelle correcte et adéquate ne peut être assurée sans prendre en considération les six paramètres fondamentaux suivants :

1. Un relevé architectural le plus précis et le plus correct possible.
2. Une bonne connaissance de l'histoire du bâtiment, de sa stratification architecturale et des techniques constructives utilisées.
3. Une caractérisation approfondie des matériaux de construction constitutifs.
4. Une analyse structurelle du bâtiment permettant la détection des anomalies structurelles et des parties vulnérables.
5. Une connaissance approfondie des exigences émises par les chartes de restauration.
6. Une connaissance des techniques de renforcement structurel et de réhabilitation appliquées à des systèmes constructifs similaires ayant démontré leur efficacité au cours des années.

Les quatre premiers points sont développés tout au long des cinq premiers chapitres. Les deux derniers points sont présentés dans ce dernier chapitre de la thèse.

Les chartes internationales de restauration sont un traité qui peut fournir un cadre international pour la sauvegarde et la restauration d'objets, sites et monuments historiques. Celles-ci permettent d'uniformiser les conditions, modalités et critères d'intervention sur le patrimoine culturel matériel afin d'éviter toute altération de l'authenticité de l'opus et / ou détérioration de son état de conservation compte tenu du contexte culturel local de chaque monument.

Au début de ce chapitre, nous présentons une rétrospective générale des différents concepts et théories relatifs à la conservation des sites et monuments historiques. Dans un deuxième temps, la genèse des chartes de restauration est établie, permettant de mettre en évidence et d'envisager les principaux critères lors d'une intervention de réhabilitation structurelle.

La deuxième section du chapitre est consacrée à la présentation des différentes techniques d'intervention structurelle retenues pour la réhabilitation structurelle de l'agréat. Chaque technique est résumée en présentant ses avantages, son contexte d'application ainsi que les recommandations techniques de mise en œuvre à travers une série d'exemples et de schémas explicatifs pertinents.

La troisième et dernière section du chapitre est consacrée à l'élaboration du projet de réhabilitation structurelle basé sur la Réalité Virtuelle comme outil de présentation permettant une récapitulation générale de tous les aspects relatifs à la conservation de l'agréat développé tout au long de la thèse.

6.1 Chartes de Restauration

6.1.1 Introduction

Les premières réflexions sur la question de la préservation du patrimoine architectural sont apparues à la fin du XIXe siècle. Depuis, de nombreux concepts et théories se sont succédés et se sont multipliés pour un objectif unique, celui d'assurer au mieux la pérennité des sites historiques.

En effet, les différentes guerres qui ont eu lieu au cours du XIXe et XXe siècles sont à l'origine d'une perte alarmante d'un patrimoine urbain, archéologique et architectural malheureusement irrécupérable. Cela dit, la notion de patrimoine et de préservation des monuments et sites historiques est apparue dans ce contexte spécifique avec la préservation de la mémoire collective pour les générations futures comme premier objectif.

Dès lors, l'apparition de chartes de restauration est venue au secours du patrimoine bâti afin d'assurer sa conservation tout en expliquant la meilleure approche à adopter.

Cependant, il est important de comprendre l'évolution des chartes de restauration ainsi que les concepts fondamentaux de préservation de l'environnement bâti historique avant de procéder à la réhabilitation structurelle de l'agréat en question.

6.1.2 Chartes de restauration

6.1.2.1 Types de restauration architecturale

Le cadre bâti environnant est composé d'une multitude de constructions appartenant à des époques et écritures stylistiques différentes.

Chaque bâtiment diffère d'un autre de par l'histoire qu'il véhicule, la mémoire qu'il symbolise ou la technicité constructive mise en œuvre.

Différents langages, différentes tendances et différentes époques pour retracer enfin une seule histoire, celle de l'apogée et du périclès d'une civilisation.

Certains de ces bâtiments ont conservé d'une manière ou d'une autre leur authenticité au cours des siècles subséquents, à l'abri de modifications dévastatrices ou de transformations architecturales désastreuses. D'autres bâtiments beaucoup moins ont subi des démolitions cédant la place : (1) à de nouvelles constructions plus tendances ou prestigieuses, (2) à des transformations structurelles et architecturales parfois radicales et «sauvages» pour répondre aux nouvelles exigences urbaines et (3) à des transformations architecturales afin d'accueillir de nouvelles fonctions.

Ce n'est qu'au XIXe siècle qu'une prise de conscience liée à l'architecture et à ses valeurs d'art et de civilisation s'est développée (Niglio, 2012).

Au cours du même siècle, les premières idées et définitions théoriques relatives à la restauration architecturale sont apparues grâce à Eugène Viollet-le-Duc et John Ruskin (Oulebsir, 2004) et (Bekaert, 1980).

Depuis, plusieurs personnalités ont réussi à théoriser le concept de restauration architecturale, dont les fondements sont parfois contradictoires. Ils sont au nombre de six et sont énumérés ci-après.

A- Restauration stylistique

Viollet-le-Duc (1814-1879), architecte français a théorisé le concept de ladite « restauration stylistique » qui consiste à transférer le bâtiment dans son unicité stylistique en lui attribuant un aspect qui n'aurait peut-être jamais été connu avant (Restauration, 2015).

Dans cette restauration, on a tendance à effacer l'histoire successive d'un bâtiment, en démolissant les parties qui ne sont pas conformes à son style d'origine et en reconstruisant les parties manquantes ou démolies dans le style d'originel du bâtiment.

B- Restauration romantique

John Ruskin (1819-1900) est un intellectuel anglais radicalement opposé à la restauration stylistique mise en place par les Français car il a accusé ce type de restauration de « mensonge ». Restauration selon Ruskin signifie toujours faire un faux, la seule opération convenue est de traiter les bâtiments autant que possible même s'ils tombent en ruine. Cette opération est définie comme une « restauration romantique » (Ruskin, 1849).

C- Restauration historique

Luca Beltrami (1854-1933), architecte italien a théorisé à la fin du XIXe siècle un nouveau concept appelé « restauration historique ». Celui-ci ne se distinguait pas beaucoup de celui de Viollet-le-Duc, il admettait seulement que les intégrations et ajouts ne devaient pas être réalisés pour un critère de cohérence stylistique mais plutôt en s'appuyant sur plusieurs sources documentaires archivistiques et historiques (Tanguay, 2012).

D- Restauration philologique

Camillo Boito (1836-1914), architecte et écrivain a défini lors du congrès des ingénieurs et architectes italiens tenu à Rome, les premiers critères d'une restauration comprise dans un sens plus moderne.

Le nouveau concept est donc appelé « restauration philologique » et se situe entre la position anglaise de Ruskin et la position française de Viollet-le-Duc. Il définit donc la position italienne de la restauration. Les monuments selon Boito doivent être consolidés plutôt que réparés et réparés plutôt que restaurés.

Toutes les parties constitutives d'un bâtiment doivent être respectées, y compris celles ajoutées au cours de son histoire. Si une nouvelle partie doit être ajoutée au bâtiment, elle doit être différenciée par ses caractères et ses matériaux sans altérer l'aspect général du monument ((Bellanca, 2008).

E- Restauration scientifique

Gustavo Giovannoni (1873-1947), architecte et ingénieur italien a introduit lors du Conseil Supérieur des Antiquités et des Beaux-Arts en 1932 en Italie le concept de "restauration scientifique".

Celui-ci reprend les principes émis par la restauration philologique mais en suggérant pour la première fois d'exploiter toutes les technologies les plus modernes pour arriver à des interventions scientifiques de la restauration (Tanguay, 2012). La charte de restauration actuelle préconise la restauration scientifique comme il sera expliqué dans la [Section 2.2](#).

F- Restauration critique

Benedetto Croce (1866-1952), philosophe, politicien et historien a été l'un des premiers à proposer des réflexions philosophiques sur la prévalence des aspects esthétiques du patrimoine bâti. Ce courant de pensée s'est développé un peu plus tard à la fin des années 1950 par un certain nombre de penseurs tels que les italiens Cesare Brandi, Roberto Pane et Renato Bonelli qui ont formulé la théorie de la restauration critique qui considèrent les monuments comme une œuvre d'art en accordant une grande importance aux valeurs esthétiques, à l'environnement immédiat, aux groupes de bâtiments, à l'aménagement du territoire et à l'urbanisme. La restauration est définie comme un acte de culture découlant de considérations critiques et esthétiques. La restauration s'appliquerait donc par définition à une œuvre d'art, son objectif étant de récupérer et de libérer la qualité artistique de l'œuvre (Tanguay, 2012).

Selon la propre définition de Bonelli de la restauration critique dans l'*Encyclopedia Universale dell'Arte* de 1963, la nouvelle théorie agit comme un processus logique qui applique le thème de « l'esthétique spirituelle »:

« Si l'architecture est un art, l'œuvre architecturale par conséquent est une œuvre d'art, le premier devoir du restaurateur devrait être celui de déterminer la valeur du monument, c'est-à-dire d'en reconnaître la présence ou du moins sa qualité artistique. Mais cette reconnaissance est un acte critique, un jugement fondé sur le critère qui identifie la valeur artistique, et donc dans ses aspects figuratifs, le degré d'importance de la valeur même de l'œuvre ; donc du devoir, qui est de récupérer, en libérant l'œuvre d'art, c'est-à-dire l'ensemble des éléments figurés qui constituent l'image et à travers lesquels elle se réalise et exprime son individualité et sa spiritualité. Toute intervention devra être subordonnée à la réintégration et à la préservation de la valeur expressive de l'œuvre, puisque l'objectif à atteindre est la libération de sa vraie forme » (Bonelli, 1963).

6.1.2.2 Genèse des chartes de restauration

Les premières réflexions menées sur la valeur patrimoniale des bâtiments et la notion de restauration sont apparues à la fin du XIX^{ème} siècle grâce à Eugène Viollet-le-Duc et John Ruskin (Section 2.1) suivies des travaux des Italiens Luca Beltrami et Camillo Boito un peu plus tard au début du siècle suivant.

Au XIX^e siècle, il était nécessaire de normaliser des principes et des concepts sans équivoque en vue de la restauration afin que l'approche soit plus scientifique qu'empirique. Les formulations théoriques des principes de restauration ont toujours eu lieu lors des conférences internationales rassemblant la contribution de professionnels de plusieurs pays, puis synthétisées dans des documents appelés « chartes de restauration ».

La première charte de restauration a été publiée en 1931 lors de la Conférence Internationale des Architectes organisée à Athènes.

Plusieurs chartes de restauration se sont succédées avec pour seul objectif d'établir un socle commun et homogène pour tous les projets de restauration à travers le monde, en respectant une démarche scientifique et en tenant compte des spécificités de chaque œuvre et de chaque culture.

Dans ce qui suit, nous présentons les différentes chartes de restauration par ordre chronologique ascendant suivi d'un organigramme récapitulatif (Fig 6.1.1).

A- La charte d'Athènes (1931)

Elle comprend 10 points axés principalement sur :

1. Une prise en charge correcte du patrimoine architectural.
2. Normaliser la législation pour ne pas favoriser l'intérêt privé par rapport au général.
3. Amplifier et promouvoir les études d'art afin d'inculquer aux gens l'amour et le respect de leur propre patrimoine architectural.

Il recommande un type de restauration philologique et rejette la restauration stylistique. Il accepte l'utilisation de matériaux modernes pour le renforcement tels que le béton armé ainsi que l'anastylose pour la restauration archéologique.

B- La charte de restauration italienne (1932)

Le Conseil Supérieur des Antiquités et des Beaux-Arts du Ministère de l'Instruction Publique a publié une charte de restauration considérée comme la première directive officielle de l'Etat italien en matière de restauration.

Cette charte reprend les mêmes points évoqués dans la charte d'Athènes avec l'introduction du concept de restauration scientifique établi par Gustavo Giovannoni ([Section 2.1](#)).

C- La Charte de Venise (1964)

La restauration architecturale est remise en cause après toutes les destructions enregistrées pendant la seconde guerre mondiale. En effet, afin de supprimer les conséquences néfastes de la guerre, plusieurs opérations de reconstruction ont été entreprises même s'il s'agissait de commettre de véritables faux historiques.

Durant la période d'après-guerre, la communauté internationale s'est réunie à Venise lors du Deuxième Congrès International des Architectes et Techniciens des Monuments afin de définir une nouvelle charte de restauration. Des personnalités italiennes à savoir : Roberto Pane, Pietro Gazzola et Cesare Brandi, y ont largement contribué.

Cette charte est composée de 16 articles immuables décrivant les principes de la méthodologie de restauration architecturale.

Elle met en évidence l'importance de l'aspect historique du bâtiment ainsi que l'introduction pour la première fois du concept de conservation de l'environnement urbain entourant les bâtiments historiques.

B- La charte de restauration italienne (1972)

Cette charte de restauration a introduit de nouveaux concepts à travers 4 documents liés : aux restaurations architecturales, archéologiques, pittoresques et culturelles autres que celles des centres historiques.

Elle comprend 12 articles définissant des objets intéressants nécessitant des actions de sauvegarde et de restauration, à partir d'objets simples aux complexes de bâtiments d'intérêt monumental, historique ou environnemental, aux centres historiques, aux collections artistiques, aux

aménagements, aux jardins, aux parcs et aux ruines découvertes lors des recherches terrestres ou sous-marines.

La « sauvegarde » se définit donc comme l'ensemble des interventions conservatrices qui ne peuvent être effectuées directement sur l'opus, tandis que la « restauration » regroupe toute intervention destinée à maintenir l'efficacité, faciliter la lecture et transmettre l'œuvre d'art au futur.

Des indications détaillées sur les interventions interdites quel que soit l'artefact sont également soulignées dans la charte.

C- Déclaration d'Amsterdam (1975)

Lors de l'année du Patrimoine Architectural Européen qui s'est tenue à Amsterdam, la carte du patrimoine architectural européen a été approuvée, reconnaissant la singularité de l'architecture européenne qui rassemble toutes les nations. Le patrimoine architectural européen est donc considéré comme faisant partie intégrante du patrimoine culturel mondial.

Les nouveautés de cette charte sont: (1) le patrimoine comprend également des zones telles que les villages et les quartiers urbains qui représentent un intérêt historique et culturel; (2) la préservation du patrimoine architectural doit être prise en compte lors de la planification urbaine et ne doit pas être considérée comme un problème marginal; (3) la réhabilitation des quartiers anciens doit être définie et réalisée, dans la mesure du possible, en respectant la composition sociale des résidents; (4) le patrimoine architectural survivra s'il est apprécié par le public et surtout par les nouvelles générations, les programmes éducatifs doivent cependant s'y intéresser à tous les niveaux.

D- La charte de Washington (1987)

C'est la charte de sauvegarde des centres et quartiers historiques quelle que soit leur taille, grande ou petite, avec leur environnement naturel ou bâti, qui expriment autres que leurs qualités de documents historiques, des valeurs de civilités urbaines traditionnelles. Ces villes sont constamment menacées de détérioration, d'effondrement ou de destruction en raison de l'urbanisation. Cependant, le Conseil International des Monuments et des Sites (ICOMOS) a souligné la nécessité d'élaborer cette charte.

Cette dernière complétant celle de Venise (1964) sur la restauration des monuments et des sites, a défini les principes, objectifs, méthodes et instruments capables de sauvegarder la qualité des villes historiques.

E- La charte de Cracovie (2000)

Au cours de l'année internationale de l'architecture, la communauté européenne promulgue une nouvelle charte de restauration intitulée « Principes pour la conservation et la restauration du patrimoine bâti », également appelée «la charte de Cracovie » où s'est tenue la conférence.

Cette carte déclare explicitement de se référer aux principes déjà contenus dans la Charte de Venise. Le terme « monument architectural » n'est plus utilisé pour faire place à la notion de « patrimoine ». Cependant, les principes de restauration ne doivent pas être appliqués uniquement aux bâtiments les plus importants mais à des centres historiques entiers. Dans ses articles, la Charte de Cracovie vise à sensibiliser à la conservation et à la gestion de l'ensemble du territoire, y compris les espaces

paysagers non construits. En effet, c'est l'ensemble du territoire qui contient des éléments très importants de l'histoire et de la culture humaines.

Le patrimoine culturel est donc classé en 5 groupes : (1) patrimoine archéologique ; (2) monuments et bâtiments historiques ; (3) Décorations architecturales ; sculptures et objets artistiques ; (4) les villes et villages historiques, (5) le paysage.

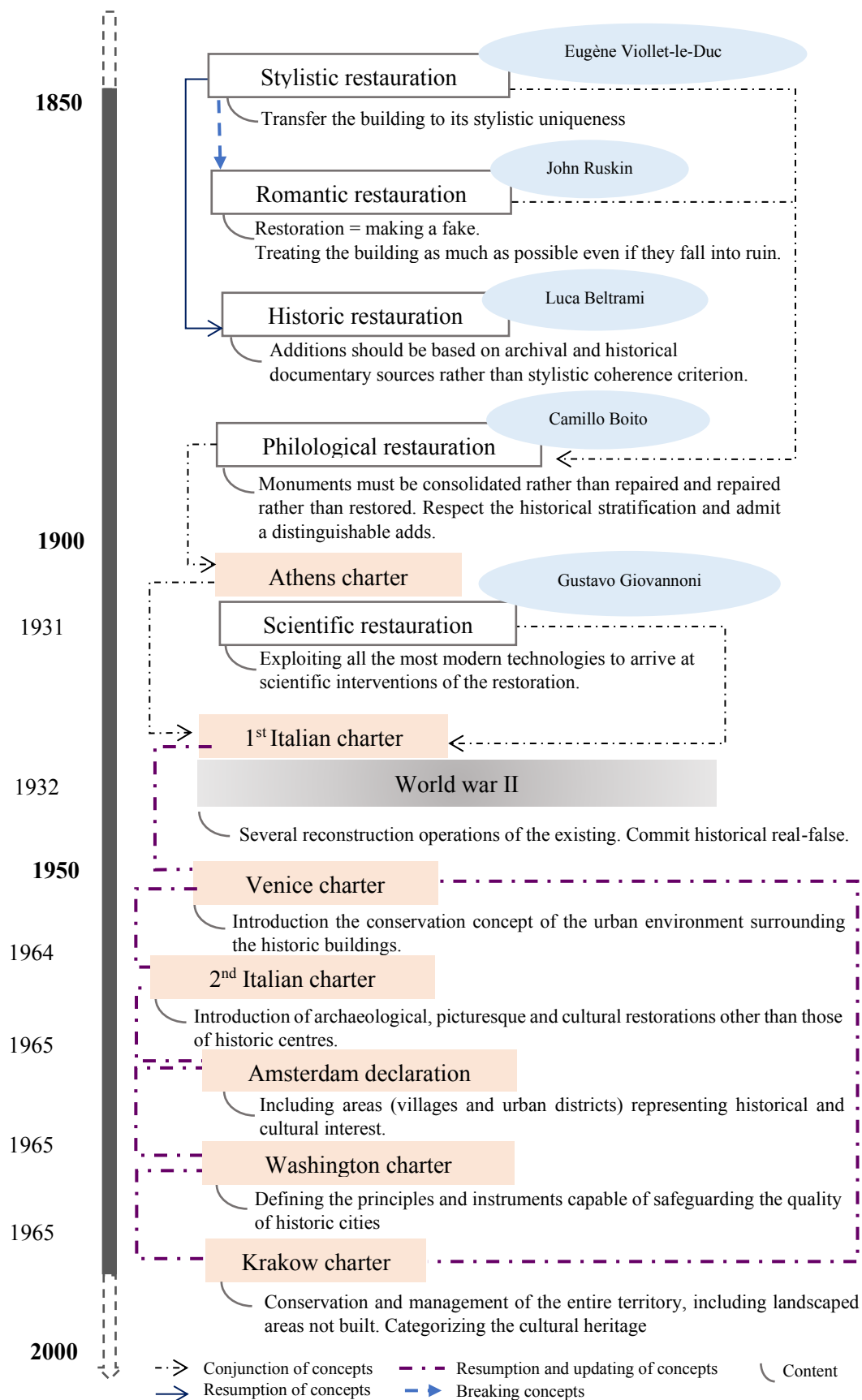


Fig 6.1.1 Organigramme récapitulatif de la genèse des chartes de restauration (Source : auteur)

6.1.3 Recommandations des chartes de restauration

La rétrospective proposée dans la [Section 6.1.2.2](#) sur les chartes de restauration permet de comprendre non seulement l'évolution des théories, concepts et principes relatifs à la conservation des sites historiques mais aussi de mettre en évidence les principaux critères à prendre en compte dans la réhabilitation structurelle. Les critères adoptés par l'ICOMOS lors du 2^{ème} Congrès des Architectes et Techniciens des Monuments Historiques de Venise en 1964 représentent la principale référence pour toutes les chartes qui ont suivi par la suite. La Charte de Venise a permis *"d'obtenir un consensus international pour établir les principes qui devraient régir la conservation et la restauration des monuments, tout en laissant à chaque nation le soin d'assurer leur application dans le cadre de sa propre culture et traditions"* (Tanguay, 2012).

Les interventions structurelles sur les sites historiques (monument, ville ou parc archéologique) sont une mise à jour des systèmes de construction avec pour objectif principal d'améliorer leurs performances structurelles et de réduire leur vulnérabilité à divers facteurs d'altération endogènes et / ou exogènes tels que les tremblements de terre. Les interventions mises en place dans ce contexte font partie d'une réhabilitation structurelle créative à travers l'insertion de « greffes structurelles » (Zouaoui, 2016). Ces dernières doivent répondre à trois critères fondamentaux, à savoir :

1. Authenticité / intégrité

Les interventions structurelles sont considérées comme une greffe et doivent respecter pleinement l'authenticité de la structure et l'image d'origine du bâtiment.

« Le choix entre les techniques "traditionnelles" et les techniques "innovantes" doit être fait au cas par cas, en donnant la préférence aux techniques les moins envahissantes et les plus respectueuses des valeurs patrimoniales, tenant en compte des exigences de sécurité et de durabilité [...] L'intervention doit être le résultat d'un projet d'ensemble intégré qui permettra de donner une échelle de valeurs aux éléments architecturaux, structurels et fonctionnels » (ICOMOS, 2003).

2. Réversibilité

Toutes les interventions structurelles doivent être aussi réversibles que possible à tout moment de la vie du bâtiment. En d'autres termes, le bâtiment peut retrouver son image d'origine à tout moment de son existence.

« Les mesures choisies doivent être autant que possible réversibles, afin que, si les nouvelles connaissances le permettent, des mesures plus adéquates puissent être mises en œuvre. Si les mesures ne peuvent être réversibles, il faut veiller à ce que des interventions ultérieures puissent encore avoir lieu [...] Les imperfections et altérations irréversibles devenues partie intégrante de l'histoire de l'ouvrage doivent être conservées lorsqu'elles ne compromettent pas les exigences de sécurité » (ICOMOS, 2003).

3. Distinguabilité

Les interventions structurelles doivent être facilement distinguables de la structure d'origine.

"Tous les matériaux utilisés pour les opérations de restauration, en particulier les nouveaux matériaux, doivent être minutieusement testés et apporter la preuve non seulement de leurs caractéristiques mais aussi de leur compatibilité avec les matériaux d'origine, afin d'éviter des effets secondaires indésirables [...] Chaque intervention doit dans la mesure du possible respecter le concept d'origine, les techniques et la valeur historique des états antérieurs de la structure et laisser des traces reconnaissables pour l'avenir » (ICOMOS, 2003).

6.1.4 Conclusion

Depuis la fin du XIX^e siècle, les débats se sont multipliés autour de la question relative à la nécessité de restaurer et / ou de conserver les sites et monuments historiques. Ces interrogations ont pour seul objectif d'assurer la pérennité du cadre bâti ancien le considérant comme source de mémoire et preuve tangible des civilisations antécédentes. Ce n'est qu'au début du XX^e siècle que les premiers concepts et orientations ont été regroupés dans ce que l'on appelle communément la « Charte de la restauration », dont la première est celle d'Athènes. Cette dernière est venue non seulement pour consolider la notion de préservation du patrimoine architectural mais surtout pour répondre à la question "comment intervenir ?"

Cependant, la rétrospective des chartes de restauration proposée dans cette section a permis de comprendre et de faire ressortir un certain nombre de critères essentiels lors de l'intervention structurelle sur l'agrégat. Aussi, cela a permis de comparer l'approche méthodologique adoptée dans cette thèse qui est en adéquation avec les recommandations stipulées dans les différentes chartes de restauration telles que l'élaboration de l'état de conservation d'œuvre architecturale, l'analyse de stratification architecturale et une bonne connaissance des matériaux de construction.

6.2 Techniques de la réhabilitation structurelle

6.2.1 Introduction

Parmi les difficultés auxquelles sont confrontés les spécialistes du patrimoine architectural figure le choix correct et adéquat des méthodes et techniques de réhabilitation structurelle des sites et monuments historiques permettant l'amélioration de leurs performances structurelles.

Cette difficulté trouve tout d'abord son origine dans la nature des systèmes constructifs anciens souvent fragiles et vulnérables, puis dans les recommandations et critères de sélection stipulés dans les chartes de restauration, qui limitent amplement les choix d'intervention des spécialistes.

Nous présentons dans cette section les différentes techniques de mise à niveau structurelle suggérées pour l'agrégat en se référant aux recommandations d'intervention structurelle issues des résultats de l'analyse structurelle présentés au [Chapitre 5](#).

6.2.2 Recommandations d'intervention structurelle

Sur la base des résultats obtenus à partir des analyses structurelles (Statique linéaire, dynamique modale et Pushover) sur les deux modèles, à savoir : le modèle (a) considérant les planchers comme des diaphragmes flexibles, et le modèle (b) considérant les planchers comme des diaphragmes rigides (dans ce dernier, les poutres ont été incluses dans le modèle), nous concluons ce qui suit :

1. L'introduction de diaphragmes horizontaux rigides grâce à l'insertion de poutres *Thuja* réduit 20% des déformations générées par l'action sismique. Les tests de compression réalisés en laboratoire sur du bois de *Thuja* ont démontré des caractéristiques mécaniques élevées par rapport à celles présentes dans la littérature avec environ 8000 MPa pour le module de Young et 40 MPa pour la résistance à la compression axiale parallèle aux fibres.

Cependant, la connexion entre les planchers et les murs porteurs dans les bâtiments en maçonnerie manque le plus souvent de consolidations supplémentaires. Dans le cas des maisons de la Casbah d'Alger et sur la base des descriptions disponibles dans la littérature, les poutres ne sont encastrées que sur toute l'épaisseur des murs porteurs, en alternant leur position pour que la continuité de la maçonnerie puisse être assurée.

➡ La première intervention consisterait à renforcer la connexion entre les poutres de *Thuja* et les murs porteurs pour augmenter la rigidité des diaphragmes horizontaux et améliorer l'efficacité du système de contreventement général de l'agrégat.

2. Plusieurs mécanismes de repture locaux ont été identifiés à travers les premiers modes de l'analyse modale ainsi que l'analyse Pushover et qui peuvent être regroupés en deux catégories, à savoir :
 - a. Hors plan par flexion horizontale des parties supérieures des façades noté principalement dans la 5^{ème} maison (la plus haute avec plus de 17m de hauteur) et dans la 4^{ème} maison avec la présence de porte-à-faux (encorbellement).
 - b. Renversement partiel composé des coins supérieurs de l'agrégat : principalement dans la 5^{ème} maison.

➡ La seconde intervention viserait à renforcer les niveaux supérieurs des façades pour réduire leur déformabilité sous l'action sismique.

3. Les galeries qui composent les patios, même si les analyses à grande échelle (celle de l'agrégat) n'ont pas montré des déformations particulières à cet égard, des torsions peuvent se produire tel que démontré à travers les résultats des analyses à l'échelle des Unités Constructives ([Section 5.4.5.2.2](#)).

➡ La troisième intervention viserait à renforcer la liaison entre les galeries (colonnes + arcades) et les murs porteurs entourant les patios.

4. Aucun dispositif authentique n'a été détecté pour le renforcement des intersections (angles) entre les parois transversales et perpendiculaires qui composent les différentes façades de l'agrégat. La qualité de la liaison entre ces murs est un élément de grande importance pour toute structure en maçonnerie car elle permet de réduire ou d'augmenter la possibilité d'un renversement des façades. Dans la littérature disponible, aucune information ou description n'a été fournie sur la qualité de la connexion ou sur la présence de dispositifs spécifiques à cet égard.

➡ La quatrième intervention viserait à renforcer les angles et la liaison entre les parois transversales et longitudinales.

6.2.3 Présentation des techniques de réhabilitation structurelle

Afin d'améliorer le comportement structurel général de l'agrégat et de réduire sa vulnérabilité sismique, un certain nombre de techniques ont été sélectionnées et ciblées en fonction de trois critères principaux, à savoir :

- 1- Les recommandations d'intervention structurelle issues des différentes analyses par Eléments Finis FEA ([Chapitre 5](#)) et qui sont résumées dans la [Section 6.2.2](#)
- 2- Les recommandations dictées par les chartes de restauration et qui sont résumées dans la [Section 6.1.3](#).
- 3- La littérature comme source de sélection des différentes techniques de renforcement structurel dont l'efficacité a été démontrée à travers plusieurs cas d'étude.

Les techniques sélectionnées sont au nombre de trois et sont présentées et synthétisées dans les sections suivantes.

6.2.3.1 Système FRCM

6.2.3.1.1 Présentation

Au cours des dernières décennies, les matériaux renforcés de fibres sous forme composite comprenant une matrice polymère et des tissus de fibres continues (FRP) ont été largement étudiés et utilisés dans le renforcement structurel des constructions civiles. Lorsque leur application s'est étendue à la construction historique en maçonnerie, la présence d'un substrat médiocre à savoir la maçonnerie, a conduit à un faible degré d'exploitation du renforcement fibreux lié à l'époxy.

Dans cette perspective, une nouvelle génération de matériaux renforcés de fibres a été étudiée, remplaçant la matrice polymère par un mortier à base de ciment ou de chaux et les tissus de fibres continues par des grilles de fibres (maille) ([Fig 6.2.1](#)). Ces nouveaux matériaux, généralement appelés FRCM (*Fabric-Reinforced Cementitious Matrix Systems*) ou TRM (*Textile Reinforced*

Mortars), peuvent être collés sur le support de maçonnerie de la même manière qu'un mortier traditionnel. Dans le contexte des édifices patrimoniaux, ces matériaux semblent plus compatibles avec les substrats de maçonnerie historiques, en raison d'un ensemble de propriétés favorables qui comprennent la respirabilité et les caractéristiques mécaniques comparables à celles du substrat. De plus, l'utilisation de matrices inorganiques confère à la couche de support une résistance plus importante aux températures élevées par rapport aux systèmes à base de polymère (c'est-à-dire organiques). En se basant sur ces informations, l'utilisation de matériaux FRCM / TRM peut être une solution possible et durable non seulement pour les constructions ordinaires en béton et en maçonnerie, mais aussi pour les problèmes de construction liés au patrimoine architectural, où une mise à niveau structurelle est nécessaire (AIELLO, 2019).



Fig 6.2.1 Application du FRCM sur une structure en maçonnerie
(Source: <https://www.ruregold.com/product/pbo-mesh-22-22/>)

L'introduction du FRCM / TRM comme système de mise à niveau des bâtiments existants est un sujet très récent et d'actualité. Les recherches sur cette technique de renforcement disponibles dans la littérature sont limitées, contrairement aux matériaux FRP dont les données expérimentales, la mise en œuvre et les recommandations techniques sont largement disponibles. En effet, un document technique a été publié par l'American Concrete Institute intitulé « *Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM)* » qui ne prend pas en compte les constructions historiques en maçonnerie. Un autre document technique a été publié et récemment ajourné en Italie, il s'agit du DT215 / 18 qui contient les lignes directrices pour la conception, l'exécution et le contrôle des interventions de renforcement utilisant des composites à matrice inorganique (CNR, 2020).

Cependant, utiliser ce matériau composite comme technique de renforcement structurel de l'agrégat semble être à la fois une solution intéressante et innovante.

6.2.3.1.2 Avantages

Il est important de préciser les avantages de l'utilisation du FRCM comme matériau composite et technique de renforcement structurel par rapport à ceux offerts par d'autres matériaux et techniques.

Les matériaux composites FRCM, proviennent de la combinaison de mailles ou de bandes de différentes natures (fibre de verre, basalte ou acier) incorporées dans des matrices minérales, des mortiers de ciment ou de chaux, à appliquer avec une épaisseur maximale de 15 mm (Costantini, 2019). Nous présentons dans ce qui suit quelques principaux avantages et motivations de sélection de ce système de renforcement.

1. Le premier avantage est la compatibilité entre les caractéristiques de respirabilité du mortier de chaux utilisé dans le système FRCM avec celles des murs en maçonnerie. Il est en effet possible d'obtenir une consolidation efficace sans altérer les conditions de confort thermo-hygrométrique.
2. Le deuxième avantage est la résistance élevée aux efforts de traction et de cisaillement grâce aux mailles inorganiques utilisées ainsi que leur bonne adhérence avec les deux couches de mortier.
3. Le troisième avantage est lié au gain significatif de résistance à la flexion et au cisaillement qui peut être obtenu avec un composite facile à appliquer dont le poids et la masse sont insignifiants.
FRCM offre une alternative à faible impact aux méthodes traditionnelles de renforcement et de modernisation en béton. Il s'agit souvent de la solution de renforcement la plus économique disponible, compte tenu du temps réduit de préparation et d'installation.
4. Le quatrième avantage est son degré acceptable de réversibilité, l'une des recommandations essentielles stipulées dans les chartes de restauration (AIELLO, 2019).
5. Le cinquième avantage est sa mise en œuvre facile qui ne nécessite pas d'équipement sophistiqué.
6. Le sixième avantage est son application discrète du fait de son épaisseur réduite et qui n'altère pas ou très peu l'image originelle et l'authenticité des monuments historiques comme le recommandent les chartes de restauration.

6.2.3.1.3 Application

La réduction de la vulnérabilité sismique des structures en maçonnerie est l'un des renforcements structurels les plus importants, en particulier lorsqu'il s'agit de sites historiques. Ces structures bénéficient souvent d'un comportement correct et acceptable vis-à-vis des charges statiques verticales qui sont appliquées, telles que les forces de compression résultant du poids propre des planchers ou du toit. Néanmoins, elles sont extrêmement vulnérables aux forces horizontales qui sont principalement causées par les tremblements de terre, et cela est dû à leur faible résistance à la traction et au cisaillement. Ceci dit, le renforcement des murs en maçonnerie en ayant recours au système FRCM peut se faire de deux manières distinctes, à savoir : renforcement large et étendu ou renforcement localisé et ciblé (Costantini, 2019).

A- Renforcement étendu

Il est appliqué sur une grande surface de mur en utilisant une grille de fibre de verre ou de basalte à l'intérieur d'une matrice de ciment ou de chaux comme dans le cas de la maçonnerie historique (Fig 6.2.4). La Fig 6.2.2 est un exemple de renforcement étendu.



a)

b)

Fig 6.2.2 Application étendue du système FRCM.

- a) Mortier de ciment (Source : <https://www.kimia.it/it/blog/sistemi-di-rinforzo-strutturale-i-compositi-frcm>)
 b) Mortier de chaux,
 (Source : <https://www.kimia.it/it/blog/come-rinforzare-pannelli-in-muratura-con-i-compositi-frcm>)

B- Renforcement localisé

Il s'applique aux surfaces ciblées préalablement déterminées par un diagnostic approfondi ou une simulation numérique. La technique consiste à utiliser des bandes en acier inoxydable ou galvanisées de largeur suffisante pour réduire la contrainte tangentielle (Costantini, 2019). Fig 6.2.5 montre un schéma d'un renforcement localisé.



Fig 6.2.3 Application localisée du système FRCM (Source : https://www.edilportale.com/news/2017/06/aziende/i-sistemi-pbo-frcm-si-confermano-una-soluzione-efficace-per-i-rinforzi-strutturali_58506_5.html)

Le FRCM est composé de trois couches superposées Fig 6.2.4, à savoir : 1) une première matrice (couche) de mortier inorganique (ciment ou chaux) qui adhère directement à la surface du mur, 2) renforcement sous forme de grille ou d'éléments unidirectionnels organisés sur un support de grille, et 3) une deuxième matrice (couche) de mortier inorganique.

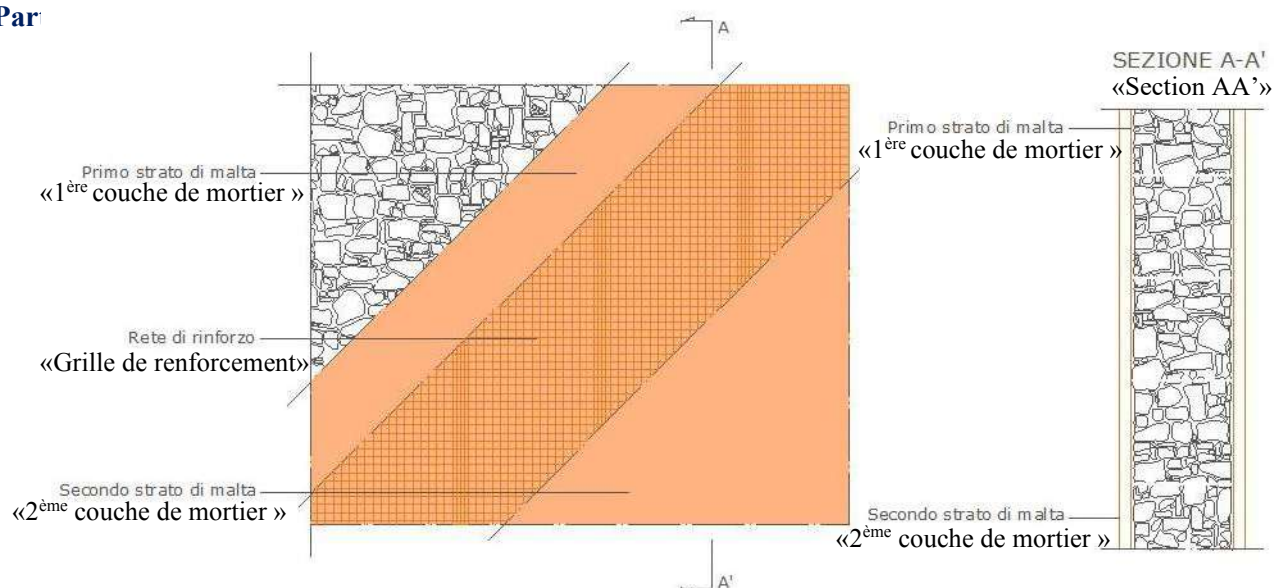


Fig 6.2.4 Composition du FRCM: application étendue
(Source : <https://www.kimia.it/it/blog/come-rinforzare-pannelli-in-muratura-con-i-compositi-frcm>)

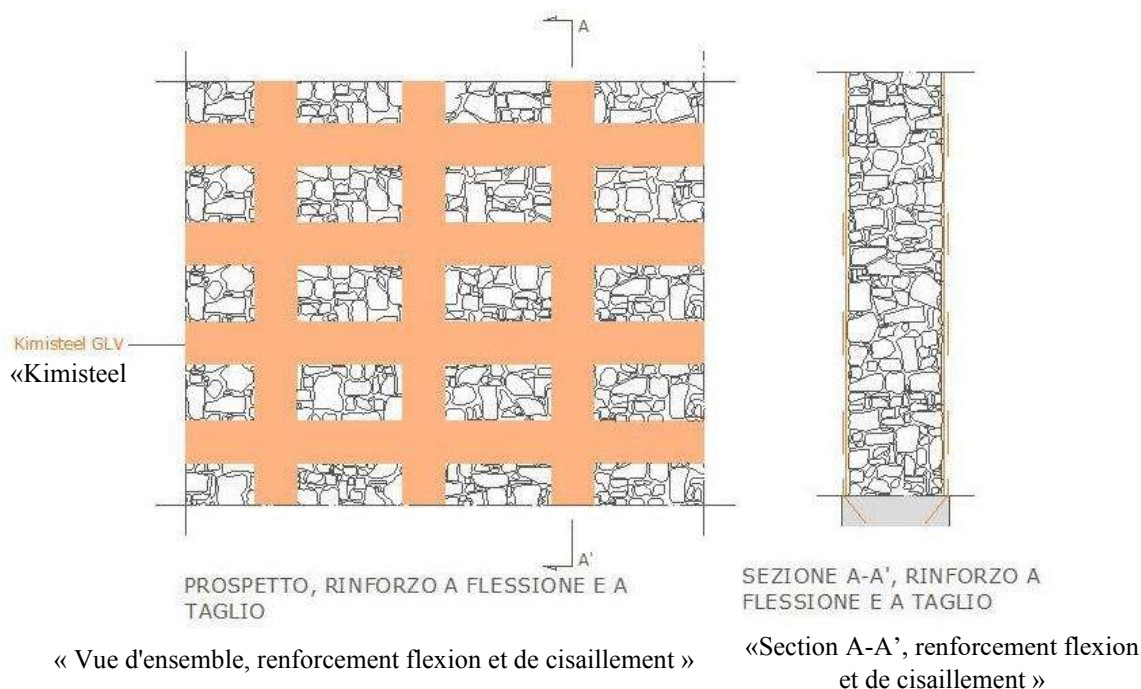


Fig 6.2.5 Composition du FRCM : application localisée
(Source : <https://www.kimia.it/it/blog/come-rinforzare-pannelli-in-muratura-con-i-compositi-frcm>)

Des connecteurs et des ancrages pour prévenir le détachement prématuré du composite lui-même du support et pour assurer une meilleure adhérence, sont utilisés dans le système composite FRCM comme le montre la Fig 6.2.6. Ces éléments doivent être ajoutés selon les instructions des manuels de préparation et d'installation que chaque fournisseur doit mettre à disposition.

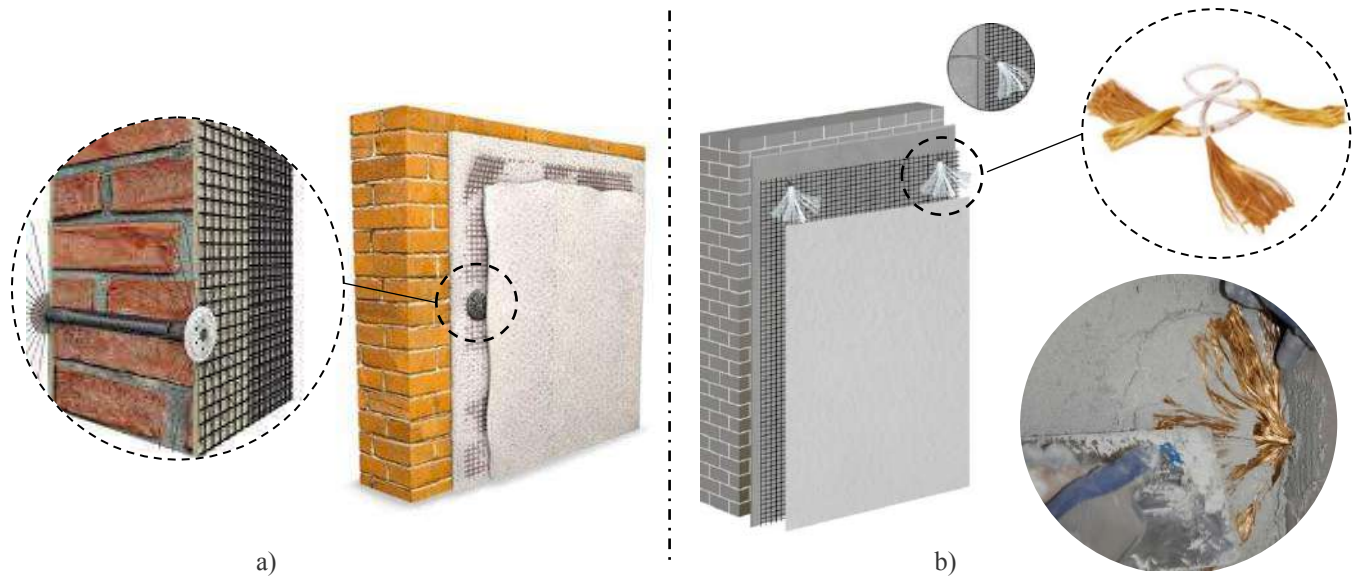


Fig 6.2.6 Application du FRCM application : système d'ancrage (connecteur).

a) connecteur en acier, b) connecteur en fibre PBO

(Source: <https://www.ingenio-web.it/27870-superbonus-110-e-rinforzo-strutturale-con-materiali-innovativi-frcm-kerakoll-lanalisi-di-un-caso-studio>; <https://www.nordresine.com/en/systems/frp-and-frcm-systems/>; <https://www.lavoripubblici.it/news/2018/07/EDILIZIA/20592/Consolidamento-e-rinforzo-strutturale-le-soluzioni-di-Fassa-Bortolo>)

Il existe plusieurs types de fibres utilisables dans le système FRCM sous forme de grille (**Fig 6.2.7**), nous listons les plus connues et utilisées, à savoir: 1) l'acier à haute résistance; 2) aramide; 3) basalte; 4) carbone; 5) Verre PBO (Polyparaphénylène Benzobisoxazole) et 6) verre résistant aux alcalis (**Calabrese, et al., 2019**) et (**Costantini, 2019**).



Fig 6.2.7 Quelques exemples de tissus (maille) (Source : (**Calabrese, et al., 2019**)).

« Une installation FRCM typique implique d'abord une simple préparation du substrat qui implique l'élimination des dommages précédents et un nettoyage pour éliminer les débris.

Ensuite, une fine couche de mortier (matrice cimentaire) est appliquée sur la surface de l'élément structurel à renforcer manuellement avec une truelle (Fig 6.2.8), puis le tissu est appliqué avec l'orientation principale du tissu dans la direction de la charge (Fig 6.2.8) et une couche de finition du mortier est appliquée sur la dernière couche de tissu, complétant le composite (Fig 6.2.8). Le composite FRCM durcit en quelques heures et atteint sa pleine résistance à 28 jours. L'installation du FRCM est simple et peut être effectuée par les ouvriers du bâtiment après une formation minimale » (Nanni, et al., 2016).



Fig 6.2.8 Application du FRCM sur un mur en maçonnerie (Source : (Nanni, et al., 2016))

6.2.3.2 Système d'ancrage

6.2.3.2.1 Présentation

L'insertion d'ancrages métalliques dans les structures de maçonnerie est l'une des techniques les plus anciennes et les plus répandues de renforcement structurel. L'efficacité de ce dispositif a été démontrée à travers les multiples exemples dont lesquels il a été utilisé comme système structurel de mise à niveau pour les constructions en maçonnerie historiques présentant une faible résistance à la traction et au cisaillement. Toujours en vigueur, ce dispositif est constitué de pièces métalliques à haute résistance qui peuvent être positionnées dans différents points de la structure dont le rôle principal est d'améliorer et de renforcer la liaison entre les différents éléments de la structure.

En effet, trois emplacements sont généralement répandus, à savoir: 1) la liaison mur / mur qui coïncide avec l'intersection de deux murs tels que les angles, 2) la liaison sol / mur qui représente l'intersection entre les éléments porteurs du plancher avec le mur porteur, et 3) la liaison mur / toit qui, dans la plupart des cas, représente l'intersection entre la ferme de la toiture (charpente) et le mur porteur (Fig 6.2.9).

Les ancrages métalliques peuvent être visibles et facilement détectables sur la surface des façades, ou bien invisibles lorsqu'ils sont encastrés dans le mur porteur en maçonnerie.

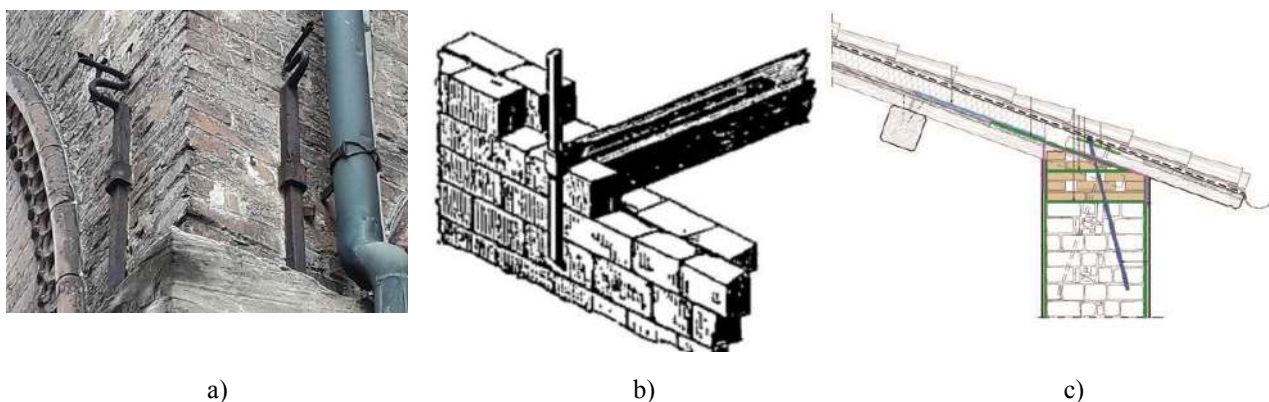


Fig 6.2.9 Système d'ancrage

- a) Connexion mur/mur (Source : <https://www.lavorincasa.it/incatenamento-strutture-murarie/>)
 b) Connexion plancher (poutre) /mur (Source : <https://www.meubliz.com/definition/ancrer/>),
 c) Connexion toiture/mur (Source : <https://www.fibrenet.it/news/26863/>)

Dans cette section, nous nous intéressons principalement au système d'ancrage utilisé comme dispositif de renforcement de la liaison entre les poutres porteuses et les murs porteurs en maçonnerie comme mentionné dans les recommandations d'intervention structurelle (**Section 6.2.2**).

Le renforcement de la jonction poutre porteuse / mur porteur rétablit le comportement «de type caisson» de la structure, réduisant ainsi considérablement la vulnérabilité sismique de la structure (**Marini, 2015**). Nous fournissons dans la **Fig 6.2.10** un croquis significatif pour illustrer ce concept.

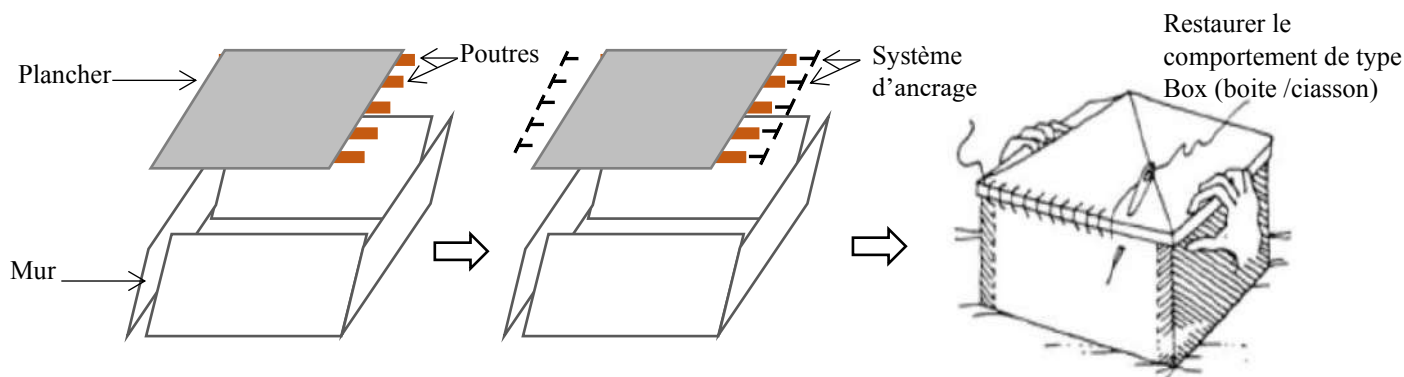


Fig 6.2.10 Concept de comportement en forme de boîte (caisson) (Source : auteur)

6.2.3.2.2 Avantages

Les systèmes d'ancrage métalliques sont largement utilisés dans les projets de restauration et de mise à niveau structurelle de constructions historiques en maçonnerie pour les nombreux avantages qu'ils offrent, les principaux sont résumés dans ce qui suit :

1. Le premier avantage est la contribution des ancrages dans la solidification de l'ensemble du système de murs porteurs, y compris les murs d'enceinte et les cloisons intérieures sur lesquelles les poutres sont fixées.

2. Ce système peut mieux contraster les poussées horizontales générées par les tremblements de terre et empêchent les façades de se renverser.
3. Le deuxième avantage est d'éviter le glissement des poutres et des fermes lors d'un tremblement de terre.
4. Le troisième avantage est son coût réduit ainsi que sa facilité d'exécution qui ne requiert pas d'équipement sophistiqué.
5. Le quatrième avantage est la réversibilité du système, l'une des principales recommandations des chartes de restauration.
6. Le cinquième avantage est sa conception variable qui peut offrir des solutions esthétiques qui s'intègrent parfaitement dans le langage architectural du bâtiment historique en question.

6.2.3.2.3 Application

Le système d'ancrage métallique pour le renforcement des liaisons entre les poutres porteuses et les murs porteurs se compose d'au moins deux parties, à savoir : 1) une barre en acier inoxydable qui est noyée dans toute l'épaisseur du mur et dans l'extrémité de la poutre, et 2) la clé d'ancrage qui représente la partie visible sur la face du mur et qui maintient la barre d'acier en place (**Fig 6.2.11**). Les systèmes d'ancrage peuvent prendre différentes formes en fonction de leur contexte d'utilisation ainsi que de la nature du site historique d'intervention (classé ou non classé) (**Fig 6.2.12**).

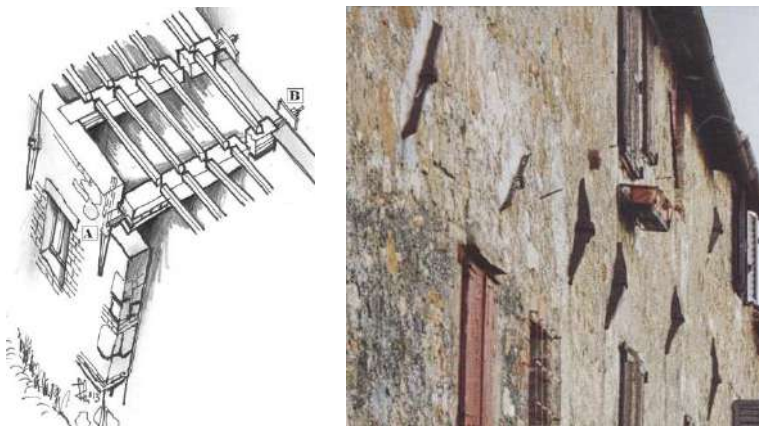


Fig 6.2.11 Système d'ancrage simple composé de deux éléments

(Source : http://www.murlocultura.com/old_site/MurloCultura_1_2013/MurloCultura_1_2013_pag12.html)

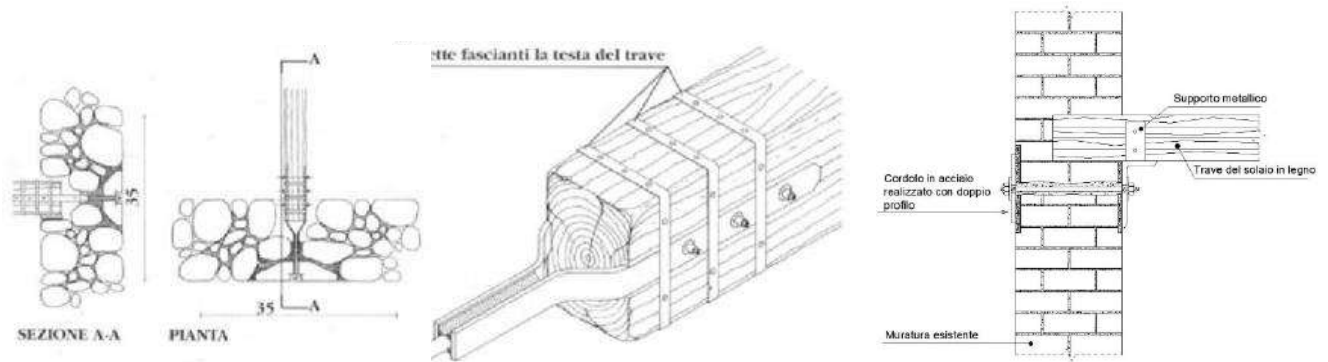


Fig 6.2.12 Quelques exemples d'un système d'ancrage complexe composé de plusieurs éléments

(Source : https://www.researchgate.net/publication/259889584_Costruzione_e_recupero_dell%27opera_muraria_Regola_dell%27arte_e_interventi_di_consolidamento/figures?lo=1, [http://www.edificiimmuratura.it/\(X\(1\)\)/Pagina/91/11-consolidamento-elevazione-cordoli-immagini](http://www.edificiimmuratura.it/(X(1))/Pagina/91/11-consolidamento-elevazione-cordoli-immagini))

Dans le cadre des maisons de la Casbah d'Alger, nous optons pour le système ayant un impact réduit sur les aspects visuels et authentiques du système constructif original, à savoir le système d'ancrage composé de deux parties.

Tout d'abord, il est important de localiser le positionnement exact des poutres porteuses dans la structure, ce qui peut être réalisé à l'aide d'un scanner laser 3D, d'une caméra thermique ou simplement d'outils plus courants tels qu'un distancemètre.

Cette opération permet également de mesurer la profondeur d'encastrement de la poutre, qui peut être partielle ou totale. Nous proposons la **Fig 6.2.13** pour schématiser le système d'ancrage.

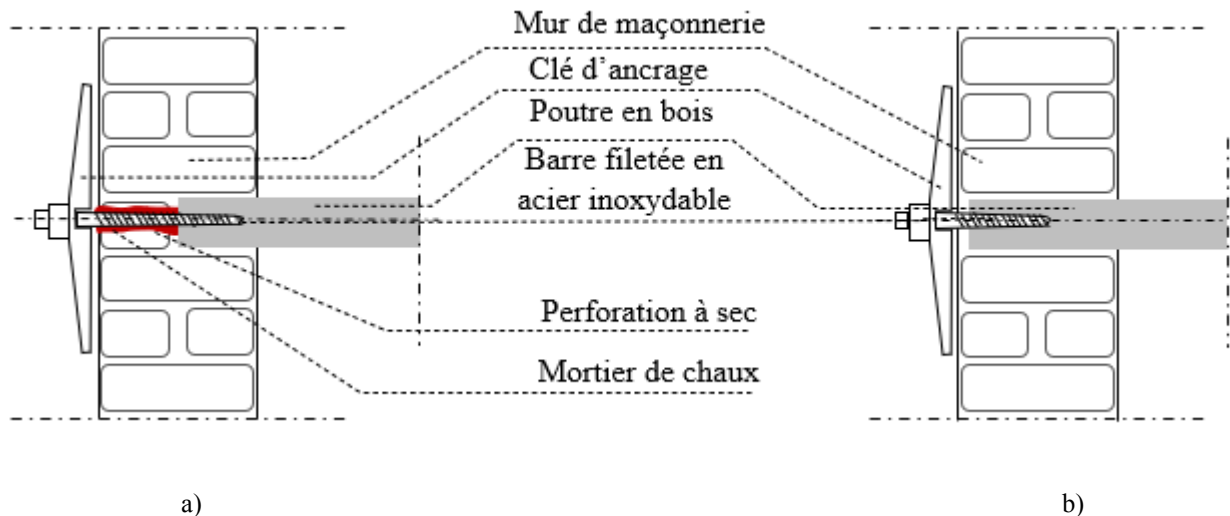


Fig 6.2.13 Schéma du système d'ancrage (Source : auteur)

a) Encastrement partiel de la poutre, b) encastrement totale de la poutre

Un pré-perçage à sec (carottage) dans la maçonnerie d'un diamètre suffisant pour la pénétration de la barre d'acier est nécessaire. Cette dernière doit être filetée pour assurer une bonne pénétration et

un bon accrochage à l'extrémité de la poutre. Le remplissage des vides se fait à l'aide d'un mortier à base de chaux.

Cependant, il est important de vérifier d'abord la qualité de la maçonnerie, sa configuration constructive, la qualité du mortier et sa résistance mécanique. Dans le cas de maçonnerie à faible résistance mécanique, un renforcement est donc nécessaire pour éviter tout poinçonnement de la maçonnerie à l'emplacement des ancrages.

6.2.3.3 Système de tirants

6.2.3.3.1 Présentation

Le système de tirants est l'une des techniques les plus utilisées et les plus répandues dans la réhabilitation et la mise à niveau structurelle des bâtiments historiques grâce à l'insertion de tirants tendus de part et d'autre de la structure fixés au moyen de clés d'ancrage. Ce système se compose donc de deux parties distinctes : 1) la pose de boulons, capuchons de clés, plaques métalliques ou ancrages de serrage fixés de part et d'autre des parois parallèles et permettant de serrer le tirant, 2) le tirant sous forme d'un câble métallique tendu (Vinci, 2014). Les plaques métalliques (ou clé) peuvent avoir des formes standards (circulaire, carrée ou piquet) comme elles peuvent varier en adoptant ainsi des formes plus esthétiques sous forme de «S» «Y», serpent ou autres (Fig 6.2.14).

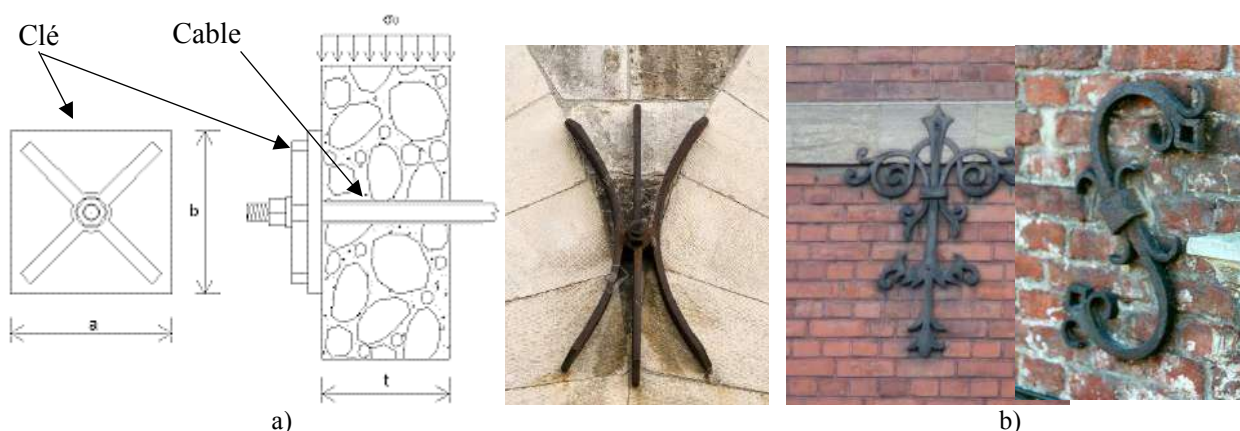


Fig 6.2.14 Système de tirants

a) Composition du système (Source : (Vinci, 2014)), b) Quelques exemples de plaques métalliques ou de clés

(Source : https://fr.123rf.com/photo_66201985_fa%C3%A7ade-d-un-ancien-b%C3%A2timent-de-ma%C3%A7onnerie-italien-avec-tirant-en-m%C3%A9tal-et-plaque-d-ancrage-.html ;
<https://www.aspecambrai.org/page-10077-ancres.html> ;
<http://www.irismonument.be/fr.glossaire.definition.Ancre.html>)

Le système permet d'améliorer le schéma structurel général grâce à un fonctionnement monolithique du bâtiment en améliorant les liaisons entre les murs orthogonaux ainsi qu'entre les murs porteurs et les planchers (Fig 6.2.15). Les poussées horizontales sont donc absorbées et réduites empêchant le renversement et l'effondrement hors plan des parois (Vincenzo, 2019).

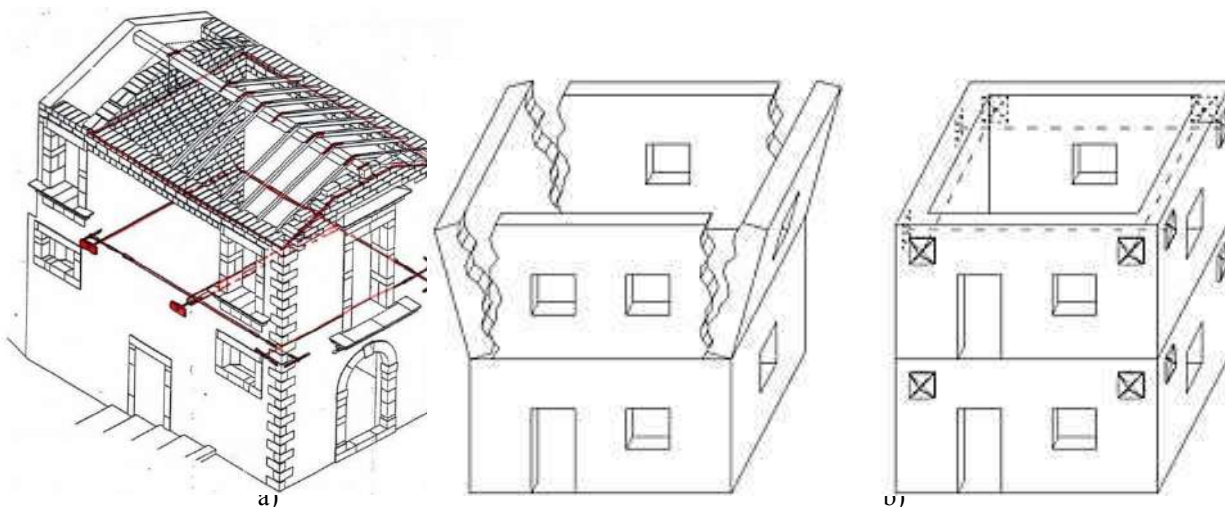


Fig 6.2.15 Principe de fonctionnement du système de tirants.

a) Positionnement des tirants (Source : <https://www.studiomadera.it/news/274-casa-antisismica>)

b) Comportement structurel du bâtiment avec et sans tirant

(Source : <https://magazine.darioflaccovio.it/2014/09/18/tiranti-in-acciaio-per-ledilizia-tipologie-e-utilizzi/>)

L'utilisation de cette technique peut différer d'une intervention à l'autre, elle dépend de la typologie architecturale et constructive du bâtiment ainsi que de l'objectif de chaque intervention. Nous listons ci-dessous quelques-unes des utilisations les plus courantes (Meireles, et al., 2013):

1. L'application horizontale de tirants au niveau du sol pour assurer la connexion de deux murs parallèles afin de réduire leur rupture hors plan (Fig 6.2.16 a).
2. L'application horizontale de tirants dans les galeries, les arcs, les voûtes et les dômes afin d'absorber les poussées horizontales générées par le poids propre de la structure ou par les tremblements de terre (Fig 6.2.16 b / c / d).
3. L'application de tirants au niveau du toit pour empêcher le glissement des poutres et des fermes lors d'un tremblement de terre (Fig 6.2.16 e).



a)



b)



c)

d)

e)

Fig 6.2.16 Différentes utilisations des tirants

- a) Consolidation murs parallèles (Source : <https://ilcapochiave.it/2018/04/13/capichiave-a-paletto-della-liguria/>)
b) Consolidation des voutes, c) Consolidation des galeries, d) Consolidation des arcades, e) Consolidation des toits
(Source : (Meireles, et al., 2013))

Les câbles constituant le système peuvent être actifs ou passifs, adhérents ou non adhérents, externes ou noyés dans des rainures de quelques centimètres de profondeur. Les câbles actifs à faible prétension et non adhérents limitent la fissuration et rendent l'intervention quasi réversible mais doivent être protégés de la corrosion.

6.2.3.3.2 Avantages

Le système de tirants métalliques est l'une des techniques de réhabilitation et de mise à niveau structurelle les plus répandues et utilisées dans les constructions de maçonnerie historiques compte tenu de son efficacité prouvée dans de nombreux projets. Nous présentons ci-dessous les principaux avantages que ce système offre :

1. Le premier avantage est qu'il favorise le comportement en forme de boîte en créant une connexion continue entre les éléments structurels (murs, murs-sols, murs-toits).
2. Le deuxième avantage est la simplicité du système, qui ne nécessite pas d'équipement très sophistiqué.
3. Le troisième avantage est l'efficacité absolument prouvée du système et son respect des principes de restauration (compatibilité, réversibilité, intervention minimale et distinguabilité) (Matteuzzi, 2019).
4. Le quatrième avantage est le coût relativement faible de la technique par rapport aux autres techniques de mise à niveau structurelle.
5. Le cinquième avantage serait la discrétion du système développé, ayant très peu d'impact sur l'image originelle et le poids du monument historique. Aussi, les plaques métalliques ou clés qui représentent la partie la plus visible du système, peuvent avoir des conceptions différentes permettant leur intégration dans le style architectural du site.

6.2.3.3 Application

Avant d'appliquer le système de tirants dans les constructions de maçonnerie historiques, un certain nombre de considérations techniques doivent être prises en compte, à savoir :

1. La qualité des faces des parois doit être soigneusement évaluée, notamment en correspondance avec les zones de contact des dispositifs de contraste, car c'est précisément dans ces zones que sont déterminées les actions locales de compression et de poinçonnage élevées.
2. La configuration typologique et constructive des murs de maçonnerie qui inclue la qualité du mortier de jointoiement ainsi que la texture des éléments constitutifs (petites pierres, briques en terre cuite, moellons, etc.). Il est parfois nécessaire de réaliser des travaux locaux de pré-consolidation de la maçonnerie avant d'installer le système de renforcement (Valentini, 2016).
3. La disposition verticale ou horizontale du piquet (clés) doit être évitée, elles doivent être inclinées d'environ 45° (entre 30° et 60°) de la ligne horizontale afin de répartir la traction sur les éléments responsables du contraste, à savoir les murs et les planchers transversaux (Fig 6.2.17). Cette disposition est la plus efficace car l'épaisseur du plancher contrecarre efficacement tout poinçonnage.

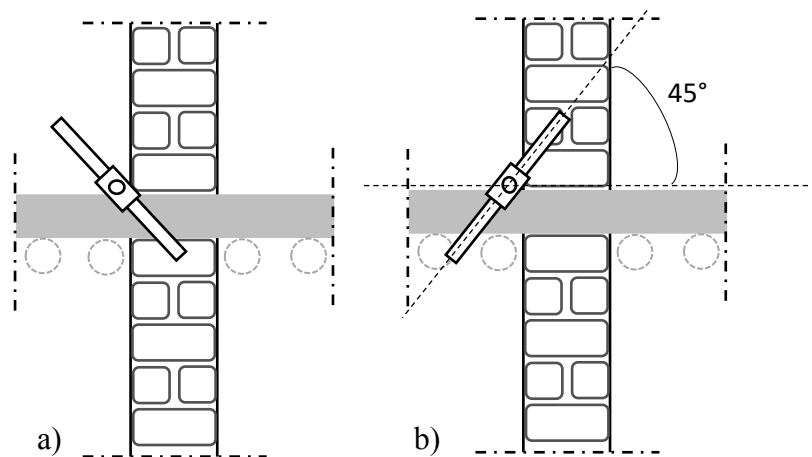


Fig 6.2.17 Disposition de la clé sous la forme d'un piquet (Source : auteur)
a) position incorrecte, b) position correcte

Lorsque la maçonnerie est incapable d'absorber la réaction d'un seul piquet, il est préférable d'utiliser des capuchons de clé à plaque nervurée, rectangulaire ou circulaire. Les positions horizontales doivent être évitées car le piquet risquerait de s'enfoncer dans le mortier de jointoiement sans fournir le contraste nécessaire (Vallucci, 2018).

4. La capacité de l'élément de contraste à transférer l'action du tirant vers la maçonnerie est cruciale sans générer des états de contrainte non durables. Les longueurs supérieures à 20 m du tirant ne sont pas recommandées car les déformations générées réduisent considérablement l'efficacité de l'action de confinement (chainage).

La mise en œuvre du système de tirants peut se résumer en trois étapes principales :

- a. La première étape est la phase de diagnostic. Cette phase est cruciale car elle permet d'analyser la structure existante, la qualité de la maçonnerie, de localiser l'emplacement du système de tirants ainsi que son dimensionnement.
- b. La deuxième étape est le perçage à sec des murs de maçonnerie en s'équipant d'un système laser pour une meilleure précision et pour garantir une insertion droite du câble.
- c. La troisième étape consiste à fixer la première plaque métallique sur la surface de la paroi porteuse, et de faire passer le câble à travers les emplacements préalablement perforés. Avant de verrouiller le câble avec la deuxième plaque métallique (clé), il est important d'exercer une traction sur le câble dont l'intensité est déterminée lors du diagnostic.

6.2.4 Conclusion

L'intervention structurelle dans les sites et monuments historiques est une tâche difficile qui requiert des compétences multidisciplinaires. Les techniques de mise à niveau structurelle sont nombreuses et variées dont les matériaux et les procédures sont en constante évolution. S'agissant de sites patrimoniaux classés comme la Casbah d'Alger, le choix des techniques devient subitement restreint et ceci est dû notamment au respect des critères de sélection exigés par les chartes de restauration qui sont évoquées dans la [Section 6.1.3](#).

Les trois techniques présentées dans cette section à savoir : le système FRCM, le système d'ancrage et le système à tirants sont celles qui sont retenues comme propositions pour améliorer les performances structurelles de l'agrégat et réduire sa vulnérabilité sismique. Ce choix se fonde fondamentalement sur la littérature ainsi que sur les recommandations d'intervention structurelle mentionnées dans la [Section 6.2.2](#).

6.3 Application de la technique de réhabilitation structurelle

6.3.1 Introduction

Nous présentons dans cette section la proposition d'intervention structurelle sélectionnée pour réduire la vulnérabilité sismique des maisons de la Casbah d'Alger.

Avant tout, il est important de considérer en amont deux aspects importants relatifs à l'ancienne médina sur lesquels s'est fondé notre choix.

Tout d'abord, l'agrégat sélectionné représentatif du tissu urbain homogène traditionnel de la Casbah d'Alger, fait partie de la catégorie majoritaire des agrégats « compacts » constituant 60% du Sous-Secteur 1 le plus authentique de la Médina tel que démontré dans la [Section 2.1.3](#). Cependant, la technique qui devrait être sélectionnée pour la mise à niveau structurelle des maisons de la Casbah d'Alger ne vise pas un agrégat singulier mais plutôt un tissu urbain entier.

- Le premier aspect serait lié au coût de l'intervention étant donné le nombre d'agrégats compacts existants et l'étendue du tissu urbain. Ceci représenterait un souci majeur pour les autorités responsables de la protection des sites et monuments historiques.
- Le second aspect est relatif au degré de technicité de la stratégie sélectionnée qui devrait prendre en considération l'expertise et le niveau de maîtrise des entreprises locales spécialisées dans la réhabilitation structurelle des sites historiques.

Cependant, la stratégie adoptée pour augmenter les performances structurelles de l'agrégat vis-à-vis du séisme, est le système à tirants. Ce dernier constituerait une solution amplement envisageable pour la réhabilitation structurelle des maisons de la Casbah d'Alger étant donné son coût réduit et la non-complexité de son exécution par rapport au système FRCM. Aussi, il pourrait satisfaire toutes les recommandations d'interventions structurelles mentionnées dans la [Section 6.2.2](#).

Nous présentons tout d'abord la configuration du système à tirants et son intégration au sein de l'agrégat mettant en avant les différentes considérations entreprises. Nous poursuivons par une analyse Pushover post-intervention afin de mener une étude comparative des performances structurelles de l'agrégat avant et après intervention.

Nous concluons cette section par l'élaboration d'un catalogue des mécanismes de rupture locaux déduits suite aux différentes analyses structurelles développées dans le [Chapitre 5](#).

6.3.2 Application du système à tirants à l'agrégat

6.3.2.1 Configuration du système

Afin d'assurer une intervention quasi-réversible du système à tirants, nous optons pour des câbles actifs à faible prétension et non adhérents. L'insertion des tirants peuvent adopter différentes configurations selon la nature du mécanisme de repture local détecté ainsi que les caractéristiques géométriques et constructives des parois porteuses. Nous proposons la [Figure 6.3.1](#) afin d'illustrer quelques variantes de ce système.

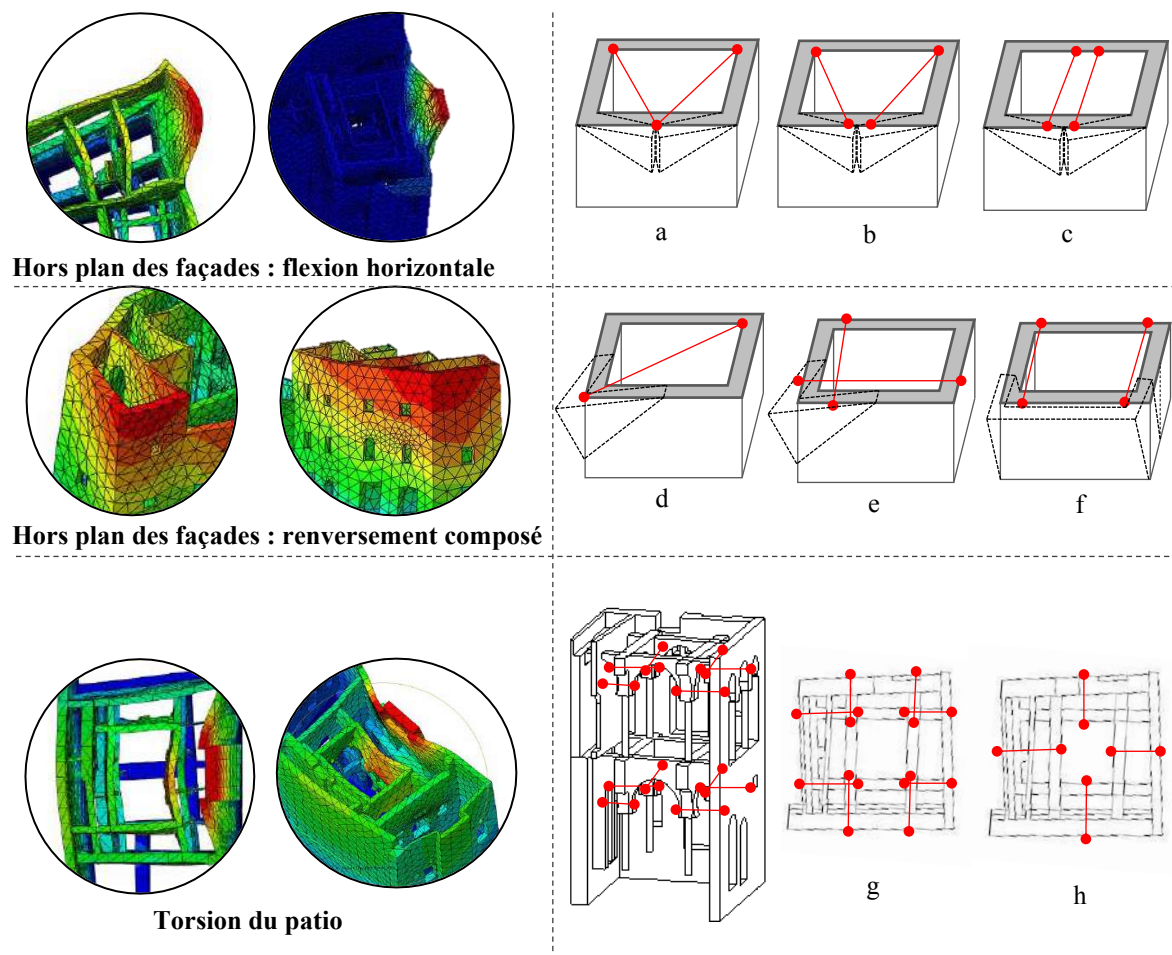


Fig 6.3.1 Quelques exemples d'insertion du système à tirants selon le mécanisme de repture local
(Source : auteur)

Les configurations « b », « c », « f » et « h » dans la **Fig 6.3.1** sont sélectionnées pour l'application du système de renforcement structurel car elles offrent une meilleure intégration visuelle discrète dans les espaces intérieurs des maisons de la Casbah d'Alger tel recommandé par les chartes de restauration. En effet, les tirants sont positionnés en dessous des planchers parallèlement aux solives porteuses de *Thuja*. Au niveau des patios en revanche, l'emplacement des tirants s'effectue aux centres des arcades entre les impostes des arcs et les murs porteurs composant les galeries. Nous proposons la **Fig 6.3.2** afin d'illustrer l'insertion des tirants au sein de l'agrégat.

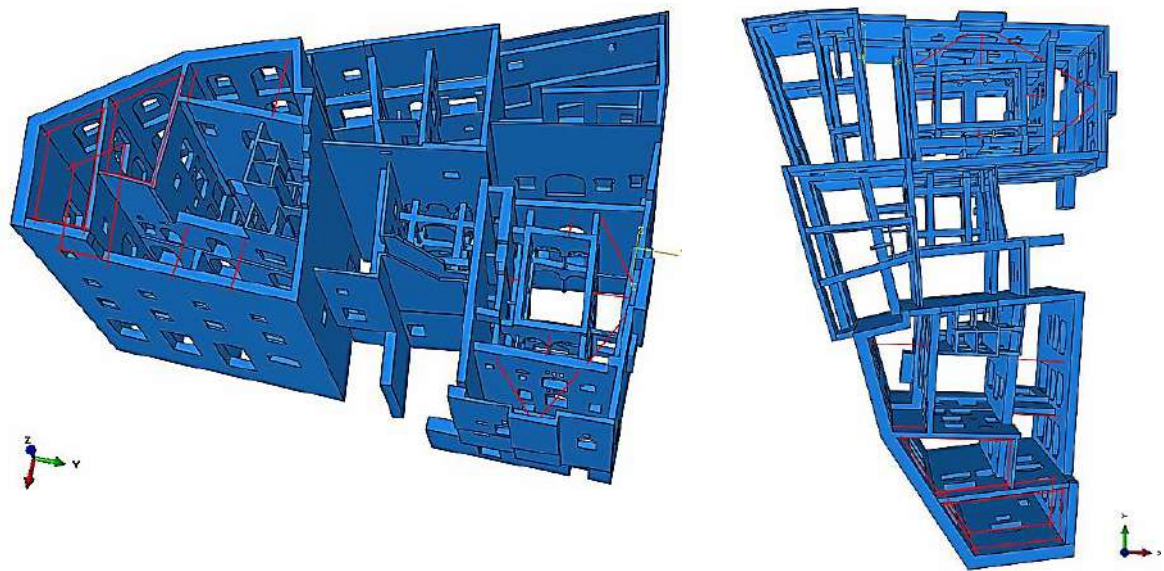


Fig 6.3.2 Application du système à tirants à l'agrégat (Source : auteur)

Afin de garantir une efficacité optimale de ce système et en raison du manque d'informations concernant la qualité de la texture des murs en maçonnerie, nous optons pour une configuration en plaque métallique (clé) autre que les piqués traditionnels afin d'éviter toute sorte de poinçonnement dans la zone d'ancrage.

6.3.2.2 Paramétrage du système

Le système à tirants a été inséré au modèle numérique (a) de l'agrégat (Section 5.3.2) en utilisant les outils de modélisation disponibles dans le programme d'Analyse par Elément Finis Abaqus. En effet, les câbles en acier inoxydables sont considérés comme des éléments à treillis (*Truss elements*) de par leurs caractéristiques géométriques ainsi que leur soumission à des efforts de traction importants lors de l'avènement du phénomène sismique.

La connexion entre les éléments solides (représentés par les murs en maçonnerie) et les éléments à treillis (représentés par les tirants) est fondamentale et doit être paramétrée afin d'assurer le fonctionnement du modèle numérique. Cependant, le type « *Tie* » est sélectionné comme contrainte entre les deux éléments solide/treillis. Aussi, il est fortement recommandé de réduire la taille du maillage des éléments solides (murs en particuliers) afin d'assurer un lancement correct de l'analyse. La taille du maillage des murs est réduite à 500 mm permettant l'obtention d'un nombre total de 256746 nœuds de l'ensemble du modèle numérique.

Nous présentons dans le Tab 6.3.1 les caractéristiques mécaniques des tirants prises en considération dans le modèle numérique.

Densité	Module de Young	Rapport de Poisson	Module de cisaillement	Diamètre
T/mm ³	MPa	/	MPa	mm
7.86E-9	200000	0.3	75000	40

Tab 6.3.1 Propriétés mécaniques des tirants

6.3.2.3 Résultats de l'Analyse par Éléments Finis post-intervention

Les résultats de l'Analyse Pushover post-intervention sont présentés ci-après. Les courbes de capacités sont tracées dans les quatre directions pour les Points de Contrôle ayant subi des mécanismes de repture locaux avant l'intervention structurelle.

Direction +X

Aucun mécanisme de repture local n'a été détecté au niveau de l'agrégat (**Fig 6.3.3**). Les courbes de capacité relatives aux points de contrôle CP 5-1 et CP 5-3 sont tracées dans la **Fig 6.3.4**.

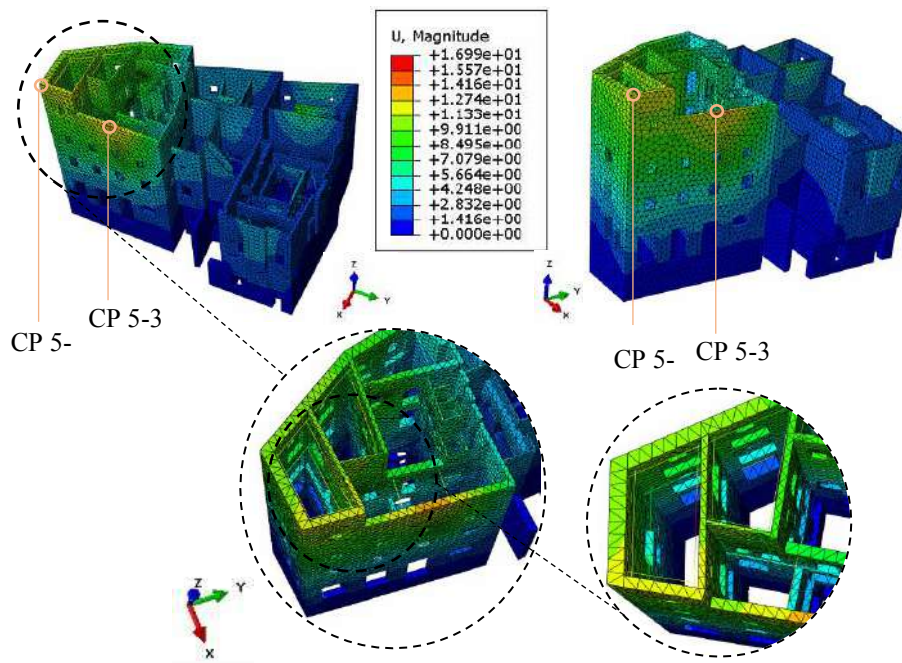


Fig 6.3.3 Résultats de la PA non-linéaire post-intervention direction +X : application sur l'agrégat (Source : auteur).

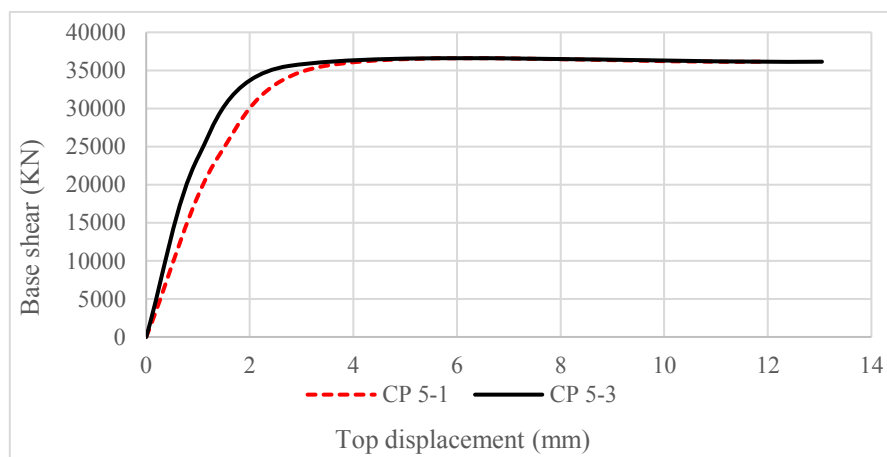


Fig 6.3.4 Courbes de Capacité post-intervention direction +X : application sur l'agrégat (Source : auteur)

Direction -X

Aucun mécanisme de repture local n'a été détecté au niveau de l'agrégat (Fig 6.3.5). Les courbes de capacité relatives aux points de contrôle CP 5-3, CP 5-6, CP 5-10 sont tracées dans la Fig 6.3.6.

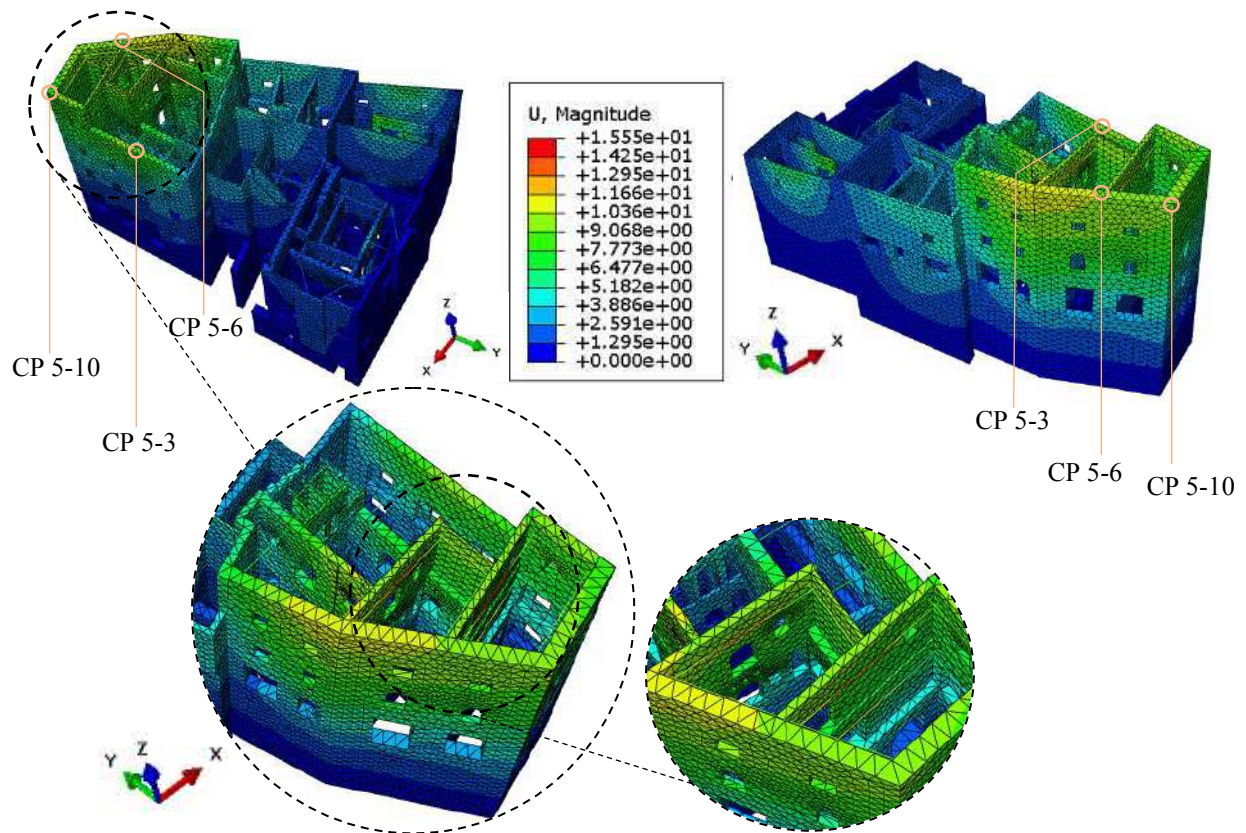


Fig 6.3.5 Résultats de la PA non-linéaire post-intervention direction -X : application sur l'agrégat (Source : auteur).

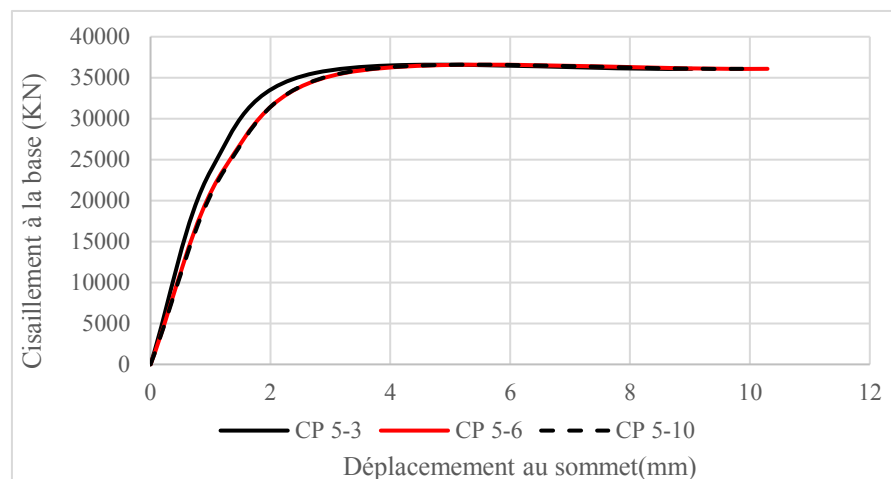


Fig 6.3.6 Courbes de Capacité post-intervention direction -X : application sur l'agrégat (Source : auteur)

Direction +Y

Début d'apparition de quelques mécanismes de repture locaux au niveau des maisons 4 et 5 de l'agrégat (Fig 6.3.7). La courbe de capacité relative au point de contrôle CP 4-4 est tracée dans la Fig 6.3.8.

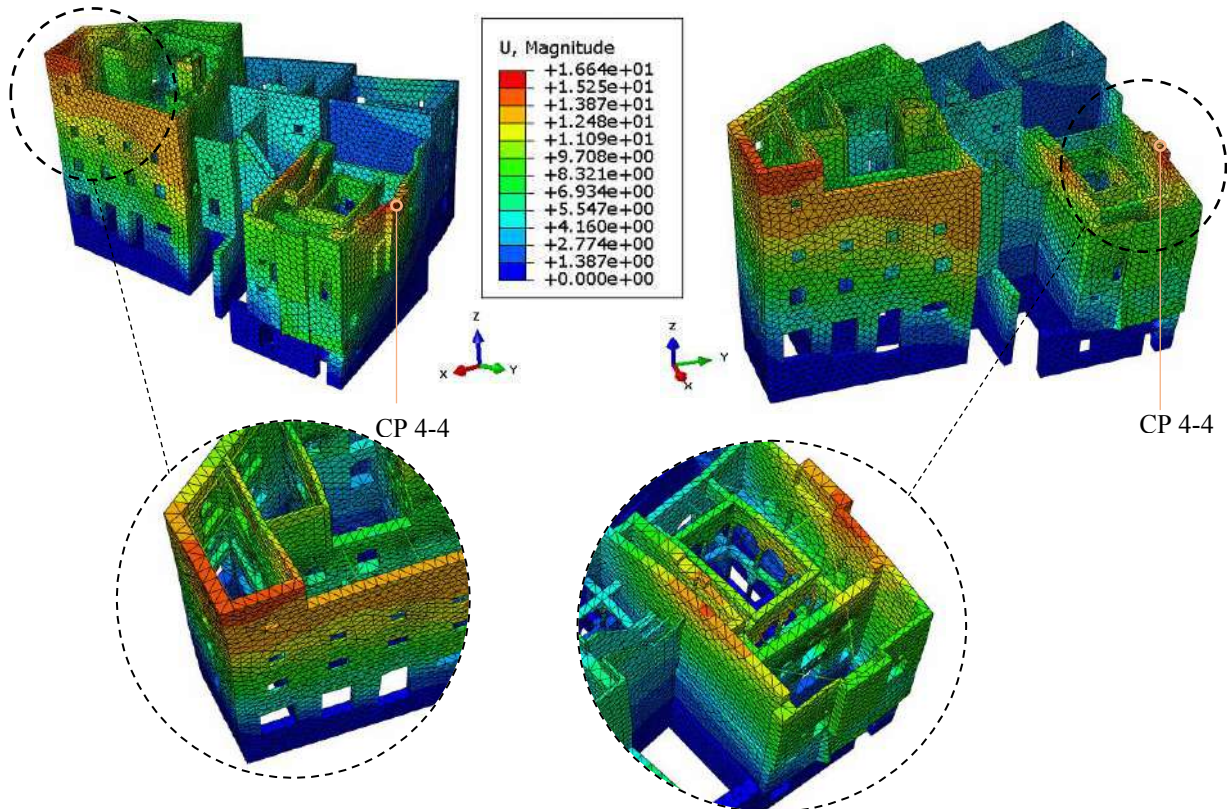


Fig 6.3.7 Résultats de la PA non-linéaire post-intervention direction +Y : application sur l'agrégat (Source : auteur).

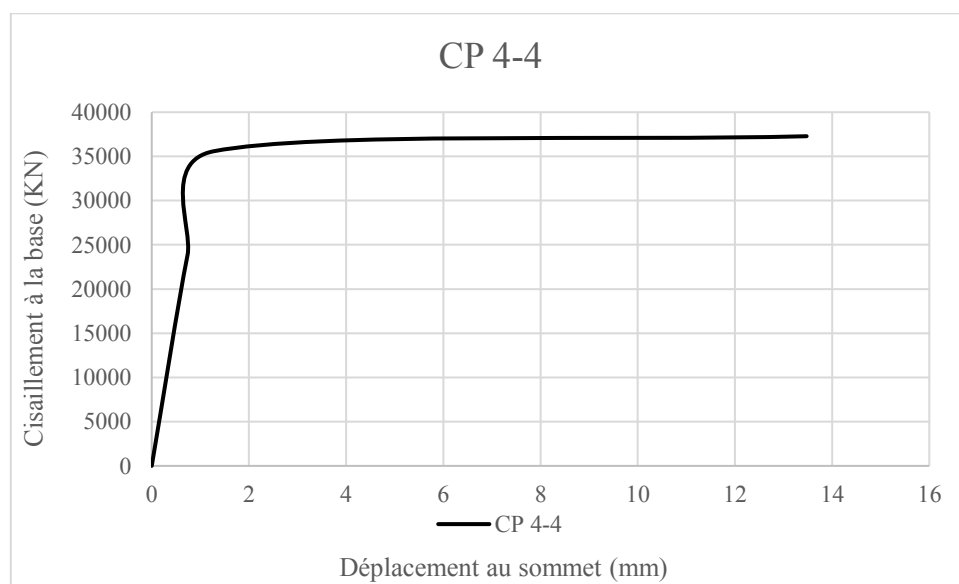


Fig 6.3.8 Courbes de Capacité post-intervention direction +Y : application sur l'agrégat (Source : auteur)

Direction -Y

Aucun mécanisme de repture local n'a été détecté au niveau de l'agrégat (Fig 6.3.9). Les courbes de capacité relatives aux points de contrôle CP 5-1, CP 5-6 et CP 5-10 sont tracées dans la Fig 6.3.10.

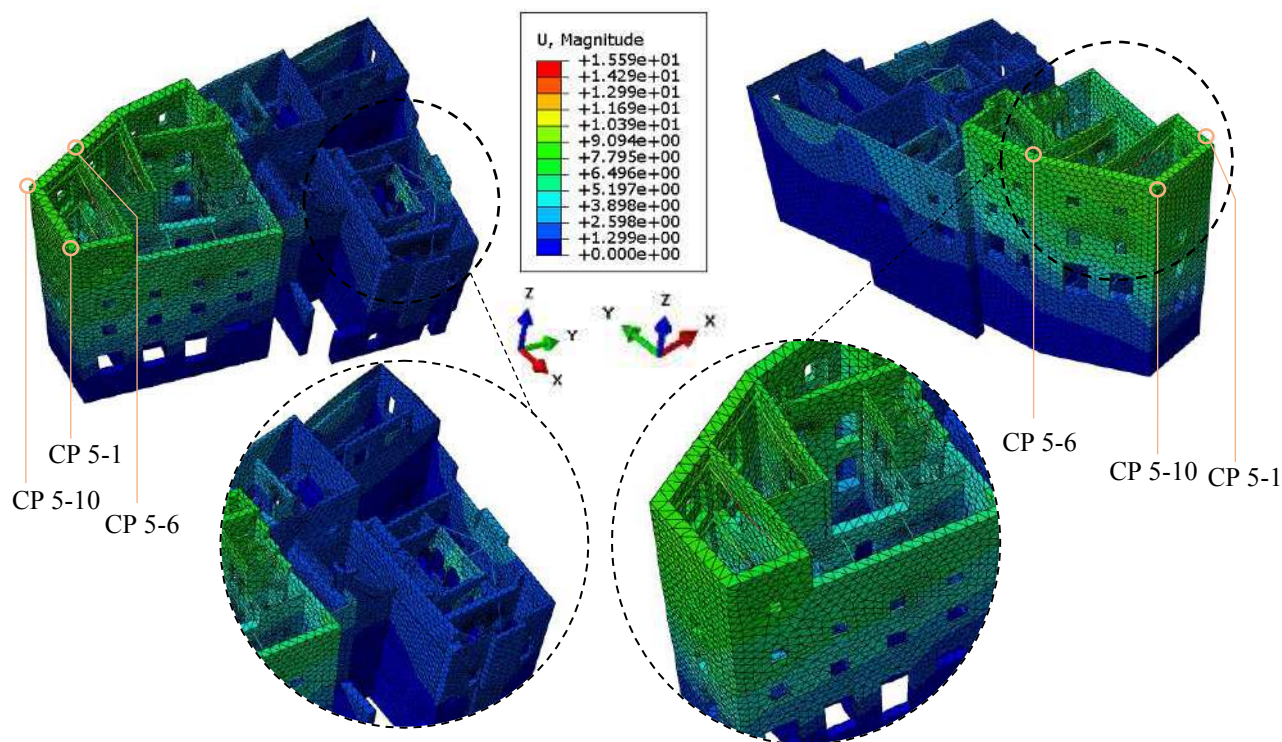


Fig 6.3.9 Résultats de la PA non-linéaire post-intervention direction -Y : application sur l'agrégat (Source : auteur).

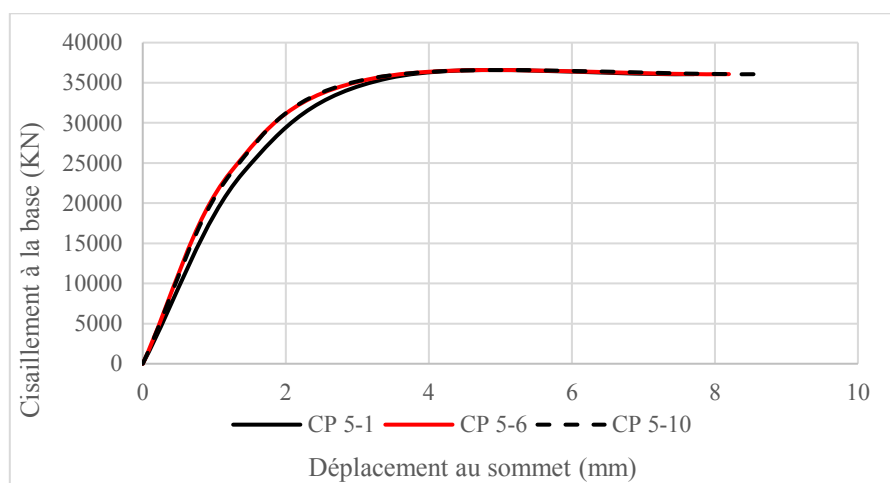


Fig 6.3.10 Courbes de Capacité post-intervention direction -Y : application sur l'agrégat (Source : auteur)

6.3.2.4 Discussion

Dans cette section, nous avons présenté les résultats de l'analyse sismique Pushover post intervention appliquée à l'ensemble de l'agrégat après insertion du système à tirants.

Les résultats démontrent nettement une réduction de la vulnérabilité sismique de l'agrégat dans toutes les directions.

Direction +X :

Les mécanismes de rupture locaux détectés au niveau des Points de Contrôle CP 5-1 et CP 5-3 avant l'intervention structurelle ont été largement neutralisés après l'insertion du système à tirants tel qu'on peut le constater à travers la **Fig 6.3.2**. L'application de l'accélération sismique (PGA) après la réhabilitation structurelle a pu s'élever à 0.68g avant d'atteindre l'état de non-convergence du modèle soit une augmentation considérable de 65%. Les efforts de traction générés par le séisme ont pu être repris par les tirants ayant une capacité très élevée de résistance à la traction dont leur sollicitation peut être notée dans la **Fig 6.3.2**.

Direction -X :

Les mécanismes de rupture locaux enregistrés au niveau des Points de Contrôle CP 5-1, CP 5-6 et CP 5-10 avant l'intervention structurelle ont été largement neutralisés après l'insertion du système à tirants tel qu'on peut le constater à travers la **Fig 6.3.4**. L'application de l'accélération sismique (PGA) après la réhabilitation structurelle a pu s'élever à 0.60g avant d'atteindre l'état de non-convergence du modèle à savoir une augmentation considérable de 85%. Cette augmentation est remarquable puisque la plus importante vulnérabilité de l'agrégat est notée dans la direction -X avec une accélération maximale de repute égale à 0.32g (avant intervention).

Direction +Y :

Les mêmes constatations sont notées dans la direction +Y pour le Point de contrôle CP 4-4. Le remarquable hors plan par flexion horizontale de la façade Est de l'agrégat avant intervention est réduit par le système à tirants mis en place tel qu'on peut le constater dans la **Fig 6.3.6**. L'application de l'accélération sismique (PGA) après la réhabilitation structurelle a pu s'élever à 1.05g avant d'atteindre l'état de non-convergence du modèle soit une augmentation de 30%.

Direction -Y :

Les mécanismes de repute locaux détectés aux points de contrôle CP 5-1, CP 5-6 et CP 5-10 avant l'intervention structurelle ont été largement neutralisés après l'insertion du système à tirants comme le montre la **Fig 6.3.9**. L'application de l'accélération sismique (PGA) après réhabilitation structurelle s'élève à 0,76g avant d'atteindre l'état de non-convergence du modèle, soit une augmentation considérable de 60%.

Nous récapitulons dans le **Tab 6.3.2** les accélérations sismiques PGA qui ont conduit à la non-convergence du modèle numérique de l'agrégat avant et après l'intervention structurelle.

Les résultats de l'analyse Pushover post-intervention ont pu être obtenus après une durée variant de 48 à 36 heures en utilisant 8 processeurs.

	+X	-X	+Y	-Y
Avant intervention	0.41g	0.32g	0.80g	0.48g
Après intervention	0.68g	0.60g	1.05g	0.76g

Tab 6.3.2 Comparaison entre l'accélération sismique PGA avant et après intervention (Source : auteur)

6.3.2.5 Conclusion

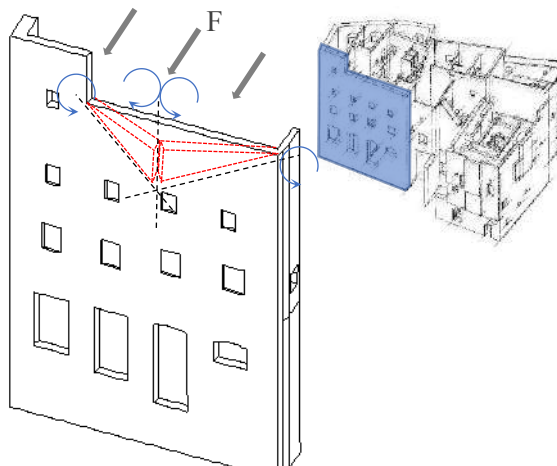
Le système à tirants est sélectionné comme étant la technique la plus avantageuse parmi les trois présentées dans la [Section 6.2](#) pour la mise à niveau structurelle de l'agrégat.

L'analyse Pushover post-intervention vient réaffirmer l'efficacité de ce système employé depuis plusieurs décennies dans la réduction de la vulnérabilité sismique des constructions en maçonnerie historiques à travers le rétablissement du comportement « de type caisson » et le fonctionnement monolithique de la structure.

Les tirants à haute résistance à la traction ont permis d'empêcher l'hors plan localisé des façades de l'agrégat par flexion horizontale ou par renversement composé ainsi que l'amélioration de la stabilité des galeries composant le patio lors d'un séisme. L'Accélération PGA de rupture du modèle numérique a atteint une augmentation de 0.28g par rapport à la direction (-X) la plus vulnérable de l'agrégat permettant ainsi une amélioration moyenne des performances structurelles de celui-ci de 60% dans toutes les directions confondues.

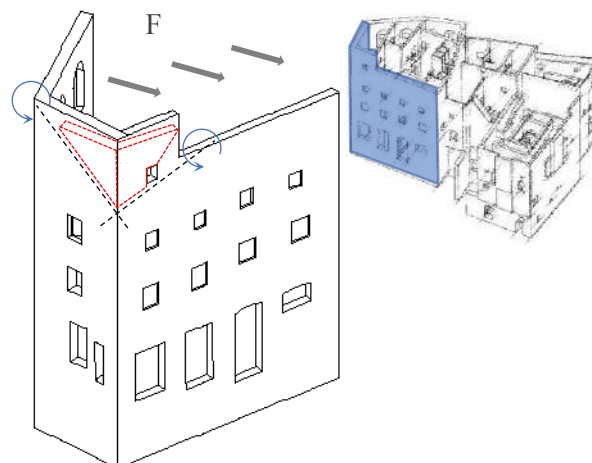
6.3.3 Catalogue des mécanismes de repture locaux des agrégats de type compact

Nous présentons dans le [Tab 6.3.3](#) un catalogue récapitulatif des différents mécanismes de repture locaux des agrégats de type compact de la Casbah d'Alger issus des analyses sismiques à l'échelle de l'agrégat et à l'échelle de l'unité d'habitation développées dans le [Chapitre 5](#).

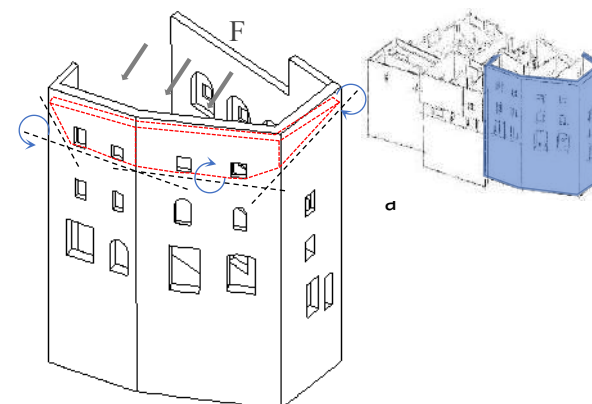
Mécanisme	Description	Illustration
Hors plan des façades (ou mur porteur): Flexion horizontale	Rotation hors plan des parties centrales supérieures des façades de l'agrégat suivie d'une création de charnières cylindriques obliques à partir de l'axe de rupture jusqu'à l'intersection des murs orthogonaux. Une autre charnière verticale se forme à partir de l'axe de rupture jusqu'à l'extrémité supérieure de la façade.	

**Renversement
composé des
angles
supérieurs**

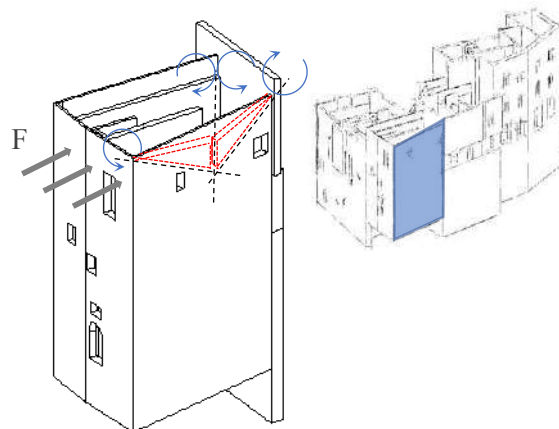
Renversement des angles supérieurs des maisons ayant une dimension altimétrique plus importante que les maisons adjacentes. Le détachement des angles s'accroît avec la présence d'ouvertures supérieures favorisant la propagation des fissures et le disloquement des murs.


**Renversement
composé partiel
des façades**

Rotation hors plan des parties supérieures d'au moins deux façades des maisons due à la formation de charnières horizontales et/ou obliques. La formation de charnières peut être accentuée avec la présence de plusieurs ouvertures contiguës dans les parois porteuses.

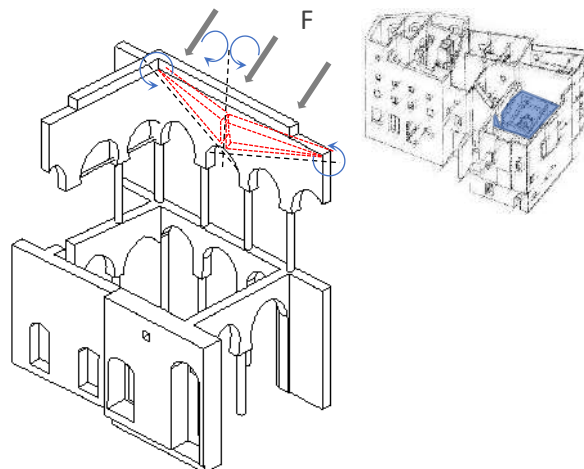

**Voilement des
murs**

Voilement des parties supérieures des façades ayant soit des caractéristiques géométriques réduites (disproportionnalité entre hauteur / épaisseur) ou ayant connu une réduction des épaisseurs dans les niveaux supérieurs, les garde-corps en particulier. Lors de fortes forces sismiques appliquées dans la direction du plan du mur, ce dernier n'est plus en mesure de contrecarrer la contrainte de compression générée.



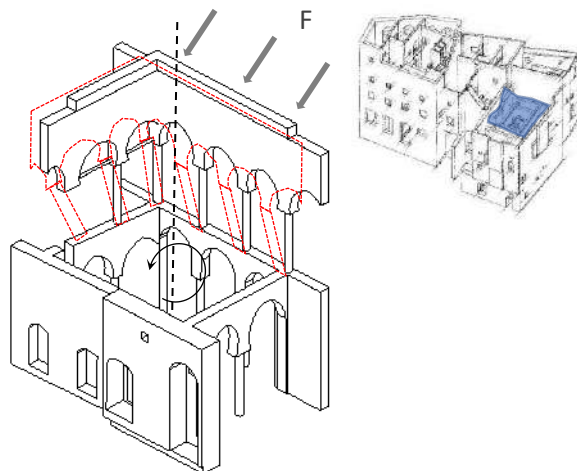
Flexion horizontale des arcades du patio

Hors plan des arcades entourant le patio par flexion horizontale au niveau de la clé d'arc. Le mécanisme est dû soit à la disproportionnalité entre l'épaisseur du mur d'arcade et la portée des arcs, soit à la dimension élevée de la flèche d'arc par rapport à l'écoinçon. Un effondrement partiel ou total de l'arcade est immédiat à la suite de propagation de fissures à partir de la clé d'arc.



Torsion des arcades du patio

Une rotation des arcades peut survenir dans deux cas ; 1) présence d'un chaînage médiocre ou insuffisant avec les murs porteurs composant les galeries et qui entourent le patio, 2) le type de liaison entre les arcs et les colonnes porteuses permettant un ou plusieurs degrés de liberté provoquant une instabilité du système sous l'effet d'importantes charges horizontales.



Tab 6.3.3 Catalogue des mécanismes de repture locaux des agrégats de type compact (Source : auteur)

6.4 Conclusion

L'intervention structurelle sur les bâtiments historiques classés dans le cadre d'une réhabilitation préventive est une mission difficile à laquelle font face les spécialistes des sites et monuments historiques.

Cette difficulté réside dans le fait d'opter pour une technique pouvant satisfaire à la fois les recommandations techniques issues des simulations structurelles numériques, les recommandations des chartes internationales de restauration et aussi le degré de technicité et de faisabilité ainsi que le contexte géo-économique auquel appartient le site historique.

Nous avons présenté dans ce chapitre le processus de sélection des trois potentielles techniques de mise à niveau structurelle de l'agrégat. Le système à tirants étant le mieux adapté au contexte algérien de par son efficacité, la « simplicité » de sa mise en œuvre ainsi que son coût relativement réduit. Ajoutant à cela, la technique sélectionnée concernerait 60 % du tissu urbain authentique représenté par les agrégats de type « compact ».

L'application du système à tirants a nettement prouvé son efficacité dans la réduction de la vulnérabilité sismique de l'agrégat et ce de 60% démontrée grâce à l'analyse Pushover post-intervention développée. Ce résultat est relativement attendu puisque la technique a fait l'objet de diverses réhabilitations structurelles des constructions historiques en maçonnerie à travers le monde.

Nous avons conclu le travail de recherche par un catalogue indispensable des mécanismes de repture locaux des agrégats compacts de la Casbah d'Alger constituant un outil et un guide référentiel pour les futurs projets de réhabilitation structurelle préventive.

De ce fait, nous achevons ce sixième chapitre de la thèse en atteignant le dernier objectif préfixé et en apportant une réponse à l'ultime problématique partielle relative à la réduction de la vulnérabilité sismique de l'agrégat à travers une intervention structurelle adéquate.

Conclusion générale

La réhabilitation structurelle des maisons de la Casbah d'Alger est une priorité primordiale en raison de l'emplacement de celle-ci sur le littoral algérien qui se distingue pour sa forte activité sismique. Cette dernière se confirme à travers les différentes tragédies historiques (séisme de 1716) et récentes (tremblement de terre de 2014) qu'a connu la ville et ses environs.

Tout d'abord, il est nécessaire de rappeler la nouveauté et la contribution scientifique de la recherche qui repose principalement sur trois apports :

1. Un apport méthodologique, à travers la proposition d'un processus de réhabilitation structurelle complet et pluridisciplinaire qui servira de guide pour les recherches futures sur des architectures vernaculaires ou sur celles représentant une organisation urbaine similaire sous forme d'agréats. Des solutions, des techniques et des alternatives sont suggérées et appliquées au cas d'étude sélectionné à chaque étape du processus méthodologique dont l'emploi des outils et normes actuels ne s'y adapte pas nécessairement.
2. Un apport historiographique où cette thèse est venue apporter des réponses concrètes et rationnelles à des hypothèses historiques relatives au système constructif et au caractère « *sismo-résistant* » (Abdessamed Foufa, 2007) des maisons de la Casbah d'Alger longtemps véhiculées par de nombreux chercheurs et auteurs. Cette thèse permettra également de documenter davantage les matériaux de construction historiques des maisons de la Casbah d'Alger.
3. Un apport pratique et opérationnel à travers l'interprétation du comportement structurel général d'un agrégat entier regroupant plusieurs unités d'habitation de typologies architecturales diverses qui permet de comprendre la corrélation entre l'unité et la macrostructure ainsi que de prioriser et d'hiérarchiser les interventions structurelles lors des projets de réhabilitation.

Il est important de mentionner que les recherches similaires appliquées aux architectures vernaculaires à l'échelle des macrostructures sont très limitées en raison de la difficulté de tout le processus de la simulation structurelle des agrégats historiques nécessitant des investissements humains et matériels très importants. Ceci se confirme à travers les résultats de la revue de littérature et le nombre très limité de recherches dans ce domaine.

L'étendue du centre historique et l'organicité du tissu urbain sont deux principales difficultés pour la sélection d'un agrégat qui puisse être à la fois représentatif, accessible et gérable. L'analyse urbaine effectuée inspirée de la typo-morphologique conçue pour les centres historiques a été d'une très grande utilité. En effet, elle a permis de distinguer en un premier lieu trois grandes catégories d'agréats à savoir : compacts, semi-ramifiés et ramifiés. La première catégorie à laquelle appartient le cas d'étude, est majoritaire représentant 60% du tissu traditionnel authentique. Ce résultat est très important puisqu'il permet la possibilité d'extrapolation des résultats obtenus sur d'autres cas d'étude similaires. D'autre part, l'analyse urbaine constitue un outil indispensable pour mettre en exergue les critères de sélection du cas d'étude tel qu'il est démontré dans la [Section 2.1](#).

Le recours à la lasergrammétrie 3D comme technique avancée du relevé architectural et d'acquisition de données in-situ, constitue un maillon important du processus méthodologique de la réhabilitation structurelle des sites historiques. En effet, confrontée à d'autres techniques de numérisation 3D telle que la photogrammétrie, la lasergrammétrie permet un gain en matière de temps et de précision. Cette dernière nécessite toutefois un certain nombre de compétences et de manèvements permettant un traitement et un assemblage correct et précis des 188 scans. Le nuage

de point final réalisé en couleur et en haute résolution représente certes un avantage lors de la visualisation de l'agrégat et la possibilité de son utilisation dans différents domaines (HBIM, FEA, RV...), mais il pourrait constituer une contrainte conséquente lors de son exploitation par des hardware peu performants. Cependant, un réglage intelligent du scanner laser 3D est indispensable.

L'obtention d'un modèle architectural et structurel complet et précis à partir d'un nuage de points volumineux d'une architecture vernaculaire complexe et entrelacée est un défi majeur. Les *Grades of Generation* disponibles dans les logiciels fondés sur le BIM et les NURBS ainsi qu'à l'interchangeabilité des formats entre les différents logiciels, ont constitué une solution envisageable et adaptée pour modéliser les formes les plus irrégulières et concevables des agrégats. Un maillage 3D correct et cohérent du modèle structurel HBIM de l'agrégat par le logiciel d'Analyse par Eléments Finis Abaqus est la première composante fondamentale d'une analyse structurelle, d'où la nécessité d'effectuer diverses manipulations et corrections, ceci d'une part.

D'autre part, la caractérisation mécanique des matériaux de construction historiques constitue la deuxième composante fondamentale de la FEA de l'agrégat puisqu'elle permet de paramétrer le modèle structurel numérique.

L'extraction des caractéristiques mécaniques à partir d'échantillons de matériaux historiques qui ne répondent pas aux normes de fabrication actuelles et dont le nombre est limité représente un autre challenge. Les techniques et procédures alternatives développées au laboratoire technique relevant du *Politecnico di Milano*, nous ont pu renseigner sur les propriétés mécaniques des trois matériaux de construction principaux des maisons de la Casbah d'Alger. Les données extraites ont démontré des valeurs supérieures à celles proposées et disponibles dans la littérature. D'autre part, la caractérisation mécanique du bois de *Thuja* dans ses trois états de conservation a également fourni des informations importantes quant à sa possibilité de réemploi lors des projets de restauration des maisons de la Casbah d'Alger.

Les résultats obtenus contribuent à l'enrichissement de la base de données relative aux propriétés des matériaux de construction historiques des maisons de la Casbah d'Alger et répondent par conséquent à la problématique partielle émise en amont de cette thèse.

Le comportement structurel de l'agrégat a pu être simulé grâce aux deux composantes fondamentales citées précédemment, celles-ci ont garanti une simulation structurelle la plus correcte et précise possible.

L'Analyse Linéaire Statique a démontré une bonne stabilité générale de l'agrégat. Elle a permis de localiser tout d'abord les parties structurelles les plus vulnérables des maisons sous un chargement statique, et de constituer une référence importante pour l'analyse sismique Pushover. Cette dernière représente une méthode envisageable pour l'évaluation des performances structurelles à l'état sismique des structures historiques en maçonnerie complexes tel le cas pour l'agrégat présenté dans cette thèse.

Les résultats de l'analyse sismique développée à l'échelle Macro ont démontré une bonne réponse structurelle générale de l'agrégat au séisme décrivant le mode de repture dominant.

Toutefois, l'agrégat a mis en exergue des modes de repture locaux plutôt que globaux en parfaite conformité avec les formes de déformation obtenues à travers l'analyse Modale. Ceci correspond

parfaitement à un comportement typique des structures historiques en maçonnerie. Des interventions de réhabilitation structurelle localisées et ciblées sont mises en évidence pour améliorer les performances structurelles de l'agrégat face au séisme.

La désagrégation de l'agrégat a constitué une étape très intéressante qui a permis de lever le voile encore une fois sur la question relative aux performances structurelles des maisons dans leurs états agrégés ou désagrégés. En effet, celles-ci ont une réponse structurelle nettement meilleure au séisme au sein d'un agrégat dont les maisons de rives sont les plus vulnérables. Ce résultat est important puisqu'il permet d'hierarchiser et de privilégier les travaux de réhabilitation structurelle menés à l'échelle Macro (agrégat) plutôt que Micro (maisons).

Cependant, les résultats de l'analyse structurelle ont permis de répondre à la problématique partielle relative au comportement structurel de l'agrégat à l'état statique et sismique ainsi que le degré d'efficacité des dispositifs empiriques « sismo-résistants » dans le contreventement des maisons.

Les techniques de réhabilitation structurelle du cadre bâti ancien sont multiples offrant une panoplie de choix aux spécialistes des sites et monuments historiques. Néanmoins, ce choix ne se réfère pas uniquement aux recommandations issues d'analyses ou de diagnostics structurels, mais il devient beaucoup plus limité lorsqu'il s'agit des sites classés auxquels se joignent d'autres considérations émanant des critères internationaux de restauration.

Ceci dit, le système sélectif mis en place fondé sur les recommandations structurelles et celles des chartes de restauration, a permis de sélectionner trois potentielles techniques qui peuvent être appliquées pour améliorer les performances structurelles de l'agrégat. Toutefois, le système à tirants est retenu comme la technique la plus avantageuse pour toutes les raisons évoquées dans la **Section 6.3**.

Les résultats de l'analyse sismique post-intervention ont pu affirmer l'efficacité du système à tirants dans la réduction de la vulnérabilité de l'agrégat et d'augmenter ses performances structurelles de 60% indiquant également un positionnement correct et ciblé des tirants.

Le processus méthodologique est achevé avec un catalogue récapitulant les différents mécanismes de repture locaux déduits grâce aux analyses structurelles développées dans le **Chapitre 5**. Cet outil est indispensable pour toutes les typologies architecturales et constructives (mosquées, églises, châteaux, palais...) situées dans les zones à forte activité sismique. En effet, celui-ci permet de cibler d'ores et déjà les zones les plus vulnérables des maisons de la Casbah ainsi que le mode de repture local.

De ce fait, le dernier objectif de la recherche est atteint en répondant à la dernière problématique partielle à savoir celle relative à la réduction de la vulnérabilité sismique de l'agrégat à travers une intervention structurelle adéquate.

Avant d'achever cette thèse, il est utile et important de mentionner les principales difficultés et limites de la présente recherche. Tout d'abord, la pluridisciplinarité de celle-ci faisant intervenir diverses compétences, outils, logiciels, background théoriques et de les véhiculer simultanément et correctement afin d'aboutir à un seul objectif final. Aussi, le caractère classé du site qui contraint véritablement le travail de terrain tels que l'obtention des différentes autorisations de la part des autorités concernées, l'extraction limitée d'échantillons...etc.

S'ajoute à cela, l'obtention de l'accord des propriétaires des maisons dont certains sont difficilement joignables pour l'exécution des relevés techniques. De plus, l'occupation des maisons et la présence de mobiliers constituent une autre contrainte lors de la numérisation 3D. Un tel travail de recherche nécessite aussi des outils informatiques extra-performants telle que la workstation ainsi que les licences de l'ensemble des logiciels utilisés.

La thèse inclut uniquement le comportement structurel des maisons de la Casbah d'Alger à l'échelle Macro (agrégat) ainsi qu'à celle de l'unité d'habitation. Aucune analyse à l'échelle Micro (portion structurelle) n'a été développée. Une étude géotechnique du sol n'a pas été réalisée pour un prélèvement précis de la composition du substratum rocheux sur lequel est implanté l'agrégat. Pour cette raison, l'étude géotechnique du bureau d'études polonais PKZ (Pulikowski Adam, 1979) représente la référence principale pour le calcul des charges géostatiques.

La caractérisation mécanique de la maçonnerie n'a pas été effectuée en raison de l'indisponibilité du nombre suffisant d'échantillons. Seule la résistance à la compression des briques et du mortier de jointoiement est obtenue grâce aux tests destructifs et semi-destructifs.

Aussi, seule la résistance à la compression parallèle aux fibres est obtenue pour les échantillons de *Thuja* prélevés indiquant trois différents stades de conservation.

Finalement, il serait intéressant de poursuivre certaines pistes de recherche afin d'approfondir davantage les caractéristiques structurelles des maisons de la Casbah d'Alger.

Tout d'abord, une analyse typo-morphologique permettrait de générer le noyau proto-urbain (une maison, une portion de maison ou un ensemble de maisons) originel ainsi que le ou les mode (s) d'agrégation des maisons. Ceci permettrait d'en déduire les typologies constructives des agrégats.

L'analyse du comportement structurel des deux autres catégories d'agrégats (semi-ramifiés et ramifiés) peut être réalisée afin de déceler l'impact des impasses (failles) sur les performances structurelles globales des macrostructures. Néanmoins, les analyses par éléments finis sont quasiment impossibles pour ces catégories d'agrégats en raison de leur complexités géométriques, leur étendues ainsi que l'hétérogénéité des matériaux de construction employés. Des méthodes d'analyses simplifiées peuvent être utilisées pour apporter des réponses rationnelles.

Il serait judicieux également de compléter la caractérisation mécanique des matériaux de construction (tuff, marbre, moellons) par le moyen de tests semi-destructifs ou non destructifs réalisés in-situ. En effet, un test de cisaillement pour les briques en terre cuite, des tests mécaniques (compression, traction, cisaillement) pour la maçonnerie traditionnelle, des tests de flexion et de compression perpendiculaires aux fibres pour le bois de *Thuja* peuvent être envisagés.

Aussi, l'analyse visuelle réalisée pour les briques en terre cuite extraites a révélé une différence chromatique et granulaire importante. Il serait intéressant de comprendre l'origine de cette dissimilitude (matière première diverse, mode de cuisson, température de cuisson...) et son impact sur leurs caractéristiques mécaniques et physicochimiques.

Il est aussi recommandé d'explorer d'autres techniques de mise à niveau structurelle ou celles déjà proposées dans le cadre de cette thèse tel que le système FRCM à travers une analyse micro locale en procédant par une micro-modélisation des matériaux de construction.

I Liste des figures

Fig 1.1.1 Ruelles historiques de quelques villes méditerranéennes.....	6
Fig 1.1.2 Dispositifs traditionnels empiriques employés à l'échelle urbaine.....	7
Fig 1.1.3 Dispositifs architecturaux empiriques et traditionnels.....	8
Fig 1.1.4 Quelques exemples de dommages structurels et d'effondrement partiel des maisons.....	9
Fig 1.1.5 Schéma du processus méthodologique.....	12
Fig 1.2.1 Organigramme représentant la classification des sources bibliographiques.....	14
Fig 1.2.2 Organisation sur le contenu général du projet de réhabilitation et de restauration initié par <i>l'Atelier</i>	15
Fig 1.2.3 Résumé du processus méthodologique adopté par A.Foufa.....	17
Fig 1.2.4 a) Murs de maçonnerie typiques des maisons de la Casbah (briques en terre cuite et mortier de chaux et d'argile), b) Epaisseur typique des murs.....	19
Fig 1.2.5 Synthèse de la caractérisation des matériaux de construction développée dans la thèse de N. Mahindad.....	20
Fig 1.2.6 Composition du plancher (chambre, galerie).....	21
Fig 1.2.7 Insertion de chaînage en bois dans la composition des arcades.....	22
Fig 1.2.8 Exemple de représentation des mécanismes d'endommagement activables.....	25
Fig 1.2.9 Exemple d'endommagement par flexion horizontale.....	26
Fig 1.2.10 Exemple d'endommagement par flexion verticale.....	26
Fig 1.3.1 Schématisation de la méthodologie générale.....	30
Fig 1.3.2 (en haut) Vue satellitaire du centre historique de Coimbra, Portugal.....	32
Fig 1.3.3 (en bas) Configuration de l'agrégat étudié, centre historique de Coimbra, Portugal.....	32
Fig 1.3.4 Méthodologie générale pour l'évaluation structurelle de l'agrégat dans le centre historique de Coimbra, Portugal.....	33
Fig 1.3.5 Exemple d'un workflow du nuage de points au BIM en passant par FEA appliqué au complexe historique de «San Francesco» situé à Cagli, région des Marches, Italie.....	34
Fig 1.3.6 Organigramme du protocole méthodologique général spécifique.....	35
Fig 2.1.1 Délimitation des sous-secteurs de la Casbah d'Alger.....	44
Fig 2.1.2 Typologies architecturales des maisons de la Casbah d'Alger.....	45
Fig 2.1.3 Sous-Secteur 1 : répartition des agrégats.....	46
Fig 2.1.4 Distribution des typologies architecturales dans chaque agrégat appartenant au Sous-Secteur 1.....	48
Fig 2.1.5 Comparaison entre les typologies architecturales authentiques et non authentiques dans chaque agrégat.....	48
Fig 2.1.6 La relation entre le nombre d'unités composant les agrégats et le nombre d'impasses.....	49
Fig 2.1.7 Répartition des agrégats selon leurs configurations.....	49
Fig 2.2.1 Sélection du cas d'étude.....	53

Fig 2.2.2 a) Aperçu Général de l'agrégat obtenu grâce au "Scene WebShare Cloud" ; b) planimétrie montrant la délimitation des maisons et le positionnement des vues des différentes allées.....	54
Fig 2.2.3 Différentes vues des ruelles entourant l'agrégat.....	54
Fig 2.2.4 a) La galerie entourant le patio de la 3 ^e maison, composée d'arcs brisés outrepassés (en ogive en fer à cheval) et soutenue par des colonnes torsadées, b) les niches murales : arc brisé, c) les niches murales : arc en anse de panier.....	55
Fig 2.3.1 Schématisation de la stratégie opérationnelle établie lors de la numérisation de l'agrégat.....	58
Fig 2.3.2 Différents scans après nettoyage et avant assemblage, un exemple de 24 scans.....	58
Fig 2.3.3 Processus d'assemblage des différents scans.....	59
Fig 2.3.4 Nuage de points final de l'agrégat obtenu après nettoyage et assemblage.....	59
Fig 2.3.5 Relevé photographique 3D.....	60
Fig 2.3.6 Relevé de l'état de conservation.....	66
Fig 2.4.1 a) Maison effondrée en rouge (Casbah d'Alger), b) localisation des échantillons (briques).....	68
Fig 3.1.1 La différence entre les logiciels BIM et de pure modélisation.....	73
Fig 3.1.2 Workflow d'exploitation des nuages de points.....	74
Fig 3.3.1 Processus de la modélisation architecturale : passage du nuage de point au modèle HBIM.....	78
Fig 3.3.2 a) 6 ^e étape du processus de la modélisation architecturale. Assemblage final de l'agrégat, le modèle structurel, b) aperçu général de l'agrégat : modèle architectural.....	79
Fig 3.3.3 Pathologie structurelle murale : processus de modélisation.....	80
Fig 3.4.1 Association des informations au modèle architectural HBIM.....	82
Fig 3.5.1 Les trois familles exportées dans Abaqus à partir du modèle HBIM développé dans Revit.....	83
Fig 3.5.2 les différentes phases du maillage.....	83
Fig 3.5.3 a) Modèle structurel (HBIM), b) Présentation générale du maillage, c) anomalies de maillage constatées sur façade Est, d) déformations locales spécifiques du maillage.....	84
Fig 3.5.4 a) Le modèle structurel (HBIM) après simplification géométrique, b) l'aperçu général du maillage, c) le maillage de la façade Est.....	85
Fig 4.1.1 organigramme récapitulatif des essais mécaniques réalisés en laboratoire.....	89
Fig 4.2.1 Extensomètres amovibles.....	91
Fig 4.2.2 Etapes de préparation des échantillons.....	92
Fig 4.2.3 Préparation des échantillons, première étape : analyse visuelle, (prise de mesures à gauche, croquis à droite).....	93
Fig 4.2.4 Présence d'impuretés superficielles et de mortier de chaux sur les briques.....	93
Fig 4.2.5 Processus de préparation des petites cubes.....	94
Fig 4.2.6 a) Troisième étape : insertion des références, b) quatrième étape : séchage au four.....	94
Fig 4.2.7 Préparation des échantillons de bois.....	96
Fig 4.2.8 Positionnement et fixation des fixateurs d'extensomètre.....	98
Fig 4.2.9 Théorie de la superposition des cubes.....	99

Fig 4.2.10 a) le boîtier de connexion ; b) superposition des cubes et mise en place des extensomètres ; c) écrasement du cube ; d) cube après écrasement.....	100
Fig 4.2.11 a) et c) collage des points de référence respectivement pour les briques 6 et 7 ; b) et d) distances entre les points de référence respectivement pour les briques 6 et 7.....	100
Fig 4.2.12 Positionnement des cubes dans la machine d'écrasement.....	101
Fig 4.2.13 Positionnement de la vidéo-caméra.....	101
Fig 4.2.14 Installation du Système Optique.....	102
Fig 4.2.15 a) et d) Coordonnées cartésiennes initiales du système (X, Y) respectivement pour les briques 6 et 7, b) et e) marques sélection respectivement pour les briques 6 et 7, c) et f) coordonnées cartésiennes initiales pour les briques 6 et 7.....	103
Fig 4.2.16 a) interface du programme du SO ; b) interface du programme de la machine de control.....	104
Fig 4.2.17 Calcul du module de Young des deux échantillons (3ABC) et (4BDE).....	105
Fig 4.2.18 Courbe élasto-plastique contrainte / déformation de l'échantillon 6.....	111
Fig 4.2.19 Courbe élasto-plastique contrainte / déformation de l'échantillon 7.....	111
Fig 4.2.20 Calcul du module de Young en utilisant la méthode conventionnelle.....	112
Fig 4.2.21 Détermination du module de Young et du rapport de Poisson par le OS.....	112
Fig 4.2.22 Module de Young obtenu par les extensomètres de type B lors de l'application du OS.....	113
Fig 4.2.23 Courbes de contrainte / déformation : du Système Optique par vidéo Vs les extensomètres de type B.....	114
Fig 4.2.24 Trajectoire des points de référence, a) échantillon 6, b) échantillon 7.....	115
Fig 4.2.25 Distance entre les fixateurs.....	115
Fig 4.2.26 Courbe contrainte / déformation correspondant aux trois échantillons.....	116
Fig 4.2.27 Calcul du module de Young du bois de <i>Thuja</i>	117
Fig 4.2.28 Processus d'obtention de la résistance à la compression du bois de <i>Thuja</i>	118
Fig 4.3.1 a) et b) Fragment de mur prélevé in-situ, c) Pénétromètre, d) application du Pénétromètre.....	112
Fig 4.3.2 Application du Résistographe.....	123
Fig 4.3.3 Résultats de l'application du Pénétromètre.....	125
Fig 4.3.4 Courbe de corrélation entre la profondeur de pénétration et la résistance de compression du mortier.....	126
Fig 4.3.5 Résultats de l'application du Résistographe.....	127
Fig 4.4.1 Application du capteur d'humidité (<i>Capacitivo</i>).....	131
Fig 4.4.2 Composition de l'appareil à ultrasons.....	132
Fig 4.4.3 Application du test ultrasonique sur le bois de <i>Thuja</i>	133
Fig 5.0 Résumé des principales composantes d'une analyse structurelle.....	147
Fig 5.1.1 Modèle structurel (HBIM) obtenu grâce au logiciel Revit.....	149
Fig 5.1.2 a) Configuration en gradins des murs porteurs, b) schématisation de la composition des planchers...	150
Fig 5.1.3 Aspects constructifs.....	151
Fig 5.1.4 Détails sur les encorbellements (<i>K'bou</i>).....	151

Fig 5.1.5 Codification des espaces.....	153
Fig 5.1.6 Direction des solives et codifications des murs porteurs.....	153
Fig 5.1.7 application de la théorie de Coulomb et Rankine.....	156
Fig 5.1.8 Distribution des murs de soutènement.....	157
Fig 5.1.9 détails sur les contraintes.....	157
Fig 5.1.10 configuration du maillage.....	158
Fig 5.1.11 Résultats de l'Analyse Linéaire Statique (déplacement en mm).....	159
Fig 5.1.12 Résultats de l'Analyse Linéaire Statique (contrainte en MPa).....	160
Fig 5.1.13 a) Courbe contrainte / déformation générale de compression, b) Courbe contrainte / déformation de traction le long de la direction Y.....	160
Fig 5.2.1 à gauche: les six failles entourant la ville d'Alger.....	161
Fig 5.2.2 à droite: répartition des zones sismiques en Algérie.....	163
Tab 5.2.1 Quelques événements sismiques les plus importants durant la période 1365-2020.....	163
Fig 5.2.3 Système de Degré de Liberté Unique SDOF.....	166
Fig 5.2.4 Forme de déformation : PA vs vibration du premier mode.....	166
Fig 5.2.5 PA et la Méthode par Capacité Spectrale CSM.....	168
Fig 5.2.6 Les courbes non linéaires et bilinéaires idéalisées du système SDOF.....	169
Fig 5.2.7 Comportement général des matériaux.....	171
Fig 5.2.8 Mur de maçonnerie traditionnelle (briques / mortier).....	172
Fig 5.2.9 Répartition des forces sismiques en fonction de la rigidité du plancher.....	174
Fig 5.2.10 Méthodologie de la PA.....	176
Fig 5.3.1 Modèles par éléments Finis : 1) planchers flexibles (Modèle a) ; 2) planchers rigides (Modèle b)....	178
Fig 5.3.2 Déformations obtenues à partir de l'analyse modale pour les deux modèles.....	181
Fig 5.3.3 Masse effective obtenue à partir de l'analyse modale.....	182
Fig 5.3.4 Masse effective totale obtenue à partir de l'analyse modale.....	182
Fig 5.3.5 Distribution des périodes à partir de l'analyse modale.....	182
Fig 5.3.6 distribution latérale de la force sismique.....	183
Fig 5.3.7 LPA Vs analyse modale: modèle (a).....	184
Fig 5.3.8 Analyse modale PA Vs linéaire : modèle (b).....	185
Fig 5.3.9 Murs vulnérables le long des axes X et Y.....	185
Fig 5.4.1 Répartition des points de contrôle.....	191
Fig 5.4.2 Résultats de la PA non-linéaire direction +X : application sur l'agrégat.....	192
Fig 5.4.3 Courbes de capacité direction +X : application sur l'agrégat.....	193
Fig 5.4.4 Résultats de la PA non linéaires direction -X : application sur l'agrégat.....	194
Fig 5.4.5 Courbes de Capacité direction -X : application sur l'agrégat.....	194
Fig 5.4.6 Résultats de la PA non-linéaire direction +Y: application sur l'agrégat.....	195

Fig 5.4.7 Courbes de capacité direction +Y : application sur l'agrégat.....	196
Fig 5.4.8 Résultats de la PA non-linéaire direction -Y: application sur l'agrégat.....	197
Fig 5.4.9 Courbes de Capacité direction -Y: application sur l'agrégat.....	197
Fig 5.4.10 Application de la CSM application : toutes les directions.....	200
Fig 5.4.11 Schéma du mécanisme de repture local par flexion horizontale.....	202
Fig 5.4.12 Schéma du mécanisme de collapse local par rabattement composé.....	203
Fig 5.4.13 Unités constructives après désagrégation.....	207
Fig 5.4.14 Résultats de la PA non-linéaire direction +X: UC 1.....	208
Fig 5.4.15 Courbes de capacité direction +X: UC.....	209
Fig 5.4.16 Résultats de la PA non-linéaire direction -X: UC 1.....	210
Fig 5.4.17 Courbes de capacité direction -X : UC 1	211
Fig 5.4.18 Résultats de la PA non-linéaire direction +Y: UC 1.....	211
Fig 5.4.19 courbes de capacité direction +Y : UC 1	212
Fig 5.4.20 Résultats de la PA non-linéaire direction -Y: UC 1	213
Fig 5.4.21 courbes de capacité direction -Y: UC 1.....	214
Fig 5.4.22 Résultats de la PA non-linéaire direction +X: UC 2	214
Fig 5.4.23 Courbes de capacité direction +X : UC 2	215
Fig 5.4.24 Résultats de la PA non-linéaire direction -X : UC 2.....	216
Fig 5.4.25 Courbes de capacité direction -X : UC 2	217
Fig 5.4.26 Résultats PA non-linéaire direction +Y : CU 2.....	217
Fig 5.4.27 Courbes de capacité direction +Y : UC 2.....	218
Fig 5.4.28 Résultats de la PA non-linéaire direction -Y : UC 2.....	219
Fig 5.4.29 Courbes de capacité direction -Y : UC 2.....	220
Fig 5.4.30 Résultats de la PA non-linéaire direction +X : UC 3	221
Fig 5.4.31 courbes de capacité direction +X : UC 3.....	222
Fig 5.4.32 Résultats de la PA non-linéaire direction -X : UC 3.....	222
Fig 5.4.33 courbes de capacité direction -X : UC 3.....	223
Fig 5.4.34 Résultats de la PA non-linéaire direction +Y : UC 3.....	224
Fig 5.4.35 Courbes de capacité direction +Y : UC 3.....	225
Fig 5.4.36 Résultats de la PA non-linéaire direction -Y : UC 3.....	225
Fig 5.4.37 courbes de capacité direction -Y: UC 3.....	226
Fig 5.4.38 Résultats de la PA non-linéaire direction +X : UC 4.....	227
Fig 5.4.39 courbes de capacité direction +X : UC 4.....	228
Fig 5.4.40 Résultats de la PA non-linéaire direction -X : UC 4.....	228
Fig 5.4.41 courbes de capacité direction -X : UC 4.....	229

Fig 5.4.42 Résultats de la PA non-linéaire direction +Y : UC 4	230
Fig 5.4.43 Courbes de capacité direction +Y : UC 4.....	232
Fig 5.4.44 Résultats de la PA non-linéaire direction -Y : UC 4.....	232
Fig 5.4.45 Courbes de capacité direction -Y: UC 4.....	233
Fig 5.4.46 Comparaison du déplacement au sommet : UC 1 direction +X.....	234
Fig 5.4.47 comparaison du déplacement au sommet : UC 1 direction -X	234
Fig 5.4.48 Comparaison du déplacement au sommet : UC 1 direction +Y	235
Fig 5.4.49 Comparaison du déplacement au sommet : UC 1 direction -Y.....	235
Fig 5.4.50 Comparaison du déplacement au sommet : UC 2 direction +X	236
Fig 5.4.51 Comparaison du déplacement au sommet : UC 2 direction -X	237
Fig 5.4.52 Comparaison du déplacement au sommet : UC 2 direction +Y	237
Fig 5.4.53 Comparaison du déplacement au sommet: UC 2 direction -Y	238
Fig 5.4.54 Comparaison du déplacement au sommet : UC 4 direction +X.....	239
Fig 5.4.55 Comparaison du déplacement au sommet : UC 4 direction -X.....	240
Fig 5.4.56 Comparaison du déplacement au sommet : UC 4 direction +Y.....	240
Fig 5.4.57 Mécanisme de rupture local : UC 4 direction -Y.....	241
Fig 5.4.58 Comparaison du déplacement au sommet : UC 4 direction -Y.....	241
Fig 5.4.59 Endommagement des agrégats historiques sous l'action sismique.....	242
Fig 6.1.1 Organigramme récapitulatif de la genèse des chartes de restauration.....	254
Fig 6.2.1 Application du FRCM sur une structure en maçonnerie.....	260
Fig 6.2.2 Application étendue du système FRCM.....	262
Fig 6.2.3 Application localisée du système FRCM.....	262
Fig 6.2.4 Composition du FRCM: application étendue.....	263
Fig 6.2.5 Composition du FRCM : application localisée.....	263
Fig 6.2.6 Application du FRCM application : système d'ancrage (connecteur).....	264
Fig 6.2.7 Quelques exemples de tissus (maille).....	264
Fig 6.2.8 Application du FRCM sur un mur en maçonnerie.....	265
Fig 6.2.9 Système d'ancrage.....	266
Fig 6.2.10 Concept de comportement en forme de boîte (caisson).....	266
Fig 6.2.11 Système d'ancrage simple composé de deux éléments.....	267
Fig 6.2.12 Quelques exemples d'un système d'ancrage complexe composé de plusieurs éléments.....	268
Fig 6.2.13 Schéma du système d'ancrage.....	268
Fig 6.2.14 Système de tirants.....	269
Fig 6.2.15 Principe de fonctionnement du système de tirants.....	270
Fig 6.2.16 Différentes utilisations des tirants.....	271

Fig 6.2.17 Disposition de la clé sous la forme d'un piquet.....	272
Fig 6.3.1 Quelques exemples d'insertion du système à tirants selon le mécanisme de repture local.....	276
Fig 6.3.2 Application du système à tirants à l'agrégat.....	277
Fig 6.3.3 Résultats de la PA non-linéaire post-intervention direction +X : application sur l'agrégat.....	278
Fig 6.3.4 Courbes de Capacité post-intervention direction +X : application sur l'agrégat.....	278
Fig 6.3.5 Résultats de la PA non-linéaire post-intervention direction -X : application sur l'agrégat.....	279
Fig 6.3.6 Courbes de Capacité post-intervention direction -X : application sur l'agrégat.....	279
Fig 6.3.7 Résultats de la PA non-linéaire post-intervention direction +Y : application sur l'agrégat.....	280
Fig 6.3.8 Courbes de Capacité post-intervention direction +Y : application sur l'agrégat.....	280
Fig 6.3.9 Résultats de la PA non-linéaire post-intervention direction -Y : application sur l'agrégat.....	281
Fig 6.3.10 Courbes de Capacité post-intervention direction -Y : application sur l'agrégat	281

II Liste des tableaux

Tab 1.2.1 Résumé des actions menées à la Casbah 1962-2005.....	16
Tab 1.3.1 Récapitulatif des similitudes entre le centre historique de Coimbra et la Casbah d'Alger.....	31
Tab 1.3.2 Outils et matériels spécifiques utilisés dans la recherche.....	39
Tab 2.1.1 Résultats de l'analyse urbaine horizontale des différents agrégats.....	47
Tab 2.1.2 La classification des agrégats par taille et nombre d'impasses.....	50
Tab 2.2.1 Critères de sélection du cas d'étude.....	53
Tab 2.2.2 Fiche technique du cas d'étude.....	55
Tab 2.3.1 Légende du relevé de l'état de conservation.....	61
Tab 2.4.1 Présentation des échantillons à l'état de prélèvement (dimensions en mm).....	70
Tab 3.2.1 Grades of Generation.....	77
Tab 4.2.1 Les cubes référencés obtenus après découpe	95
Tab 4.2.2 dimensions des échantillons de bois.....	97
Tab 4.2.3 Le module de Young obtenu par les extensomètres de type A.....	106
Tab 4.2.4 Résultat du test de compression.....	106
Tab 4.2.5 Moyenne générale de la résistance à la compression des briques en terre cuite.....	107
Tab 4.2.6 Étape 1 de la conversion des résultats.....	108
Tab 4.2.7 Calcul du coefficient de conversion.....	109
Tab 4.2.8 Étape 3 Calcul de la déformation (ϵ) sur un exemple de trame (y4-y7).....	110
Tab 4.2.9 Calcul du module de Young du bois de <i>Thuja</i>	117
Tab 4.2.10 Moyenne générale de la résistance à la compression du bois de <i>Thuja</i>	118
Tab 4.3.1 Résultats de l'application du Pénétromètre.....	124
Tab 4.3.2 Résultats de l'application du résistographe (profondeur de forage et vitesse d'avancement).....	125
Tab 4.4.1 Résultats de l'application du capteur d'humidité.....	126
Tab 4.4.2 Résultats de l'application du test ultrasonique sur les briques en terre cuite.....	133
Tab 4.4.3 Résultats du test ultrasonique sur le bois de <i>Thuja</i>	134
Tab 4.5.1 Incertitude de l'input et distribution de probabilité.....	137
Tab 4.5.2 Calcul du coefficient de sensibilité.....	138
Tab 4.5.3 Calcul des incertitudes standard.....	138
Tab 4.5.4 Calcul des incertitudes standard.....	139
Tab 4.5.5 Calcul des incertitudes standard.....	140
Tab 4.5.6 Calcul des incertitudes standard.....	141
Tab 4.5.7 Calcul des incertitudes standard.....	142
Tab 5.1.1 Le calcul du poids du plancher à l'état limite ultime (ULS)	152

Tab 5.1.2 Calcul des charges appliquées aux murs porteurs.....	154
Tab 5.1.3 Densités et angles de friction interne des roches.....	156
Tab 5.1.4 Calcul de la poussée des terres.....	157
Tab 5.1.5 Caractéristiques mécaniques des matériaux de construction.....	158
Tab 5.2.1 Quelques événements sismiques les plus importants durant la période 1365-2020.....	163
Tab 5.2.2 Coefficient de chargement appliqué lors des étapes de l'AP.....	173
Tab 5.3.1 Résultats de l'analyse modale appliquée modèle (a).....	179
Tab 5.3.2 Résultats de l'analyse modale appliquée modèle (b).....	180
Tab 5.4.1 Calcul des charges appliquées aux murs porteurs : analyse PA	188
Tab 5.4.2 PA non-linéaire : accélération sismique appliquée à l'agrégat (modèle (a) et (b))	189
Tab 5.4.3 Propriétés mécaniques des matériaux de construction.....	190
Tab 5.4.4 Données du CDP supposées pour les murs de maçonnerie.....	191
Tab 5.4.5 application étape par étape de la CSM: direction +X.....	199
Tab 5.4.6 Résumé des résultats de la PA appliquée aux deux modèles (a) et (b).....	204
Tab. 5.4.7 Performance level confrontation of the aggregate (Source: author).....	205
Tab 5.4.7 PA non linéaire : accélération sismique appliquée à CU 03.....	220
Tab 6.3.1 Propriétés mécaniques des tirants.....	277
Tab 6.3.2 Comparaison entre l'accélération sismique PGA avant et après intervention.....	283
Tab 6.3.3 Catalogue des mécanismes de repture locaux des agrégats de type compact.....	285

III Références bibliographiques

AIELLO Antonietta Technical Committee IMC [Online] // International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures. - 2019. - 11 09 2020. - <https://www.rilem.net/groupe/imc-durability-of-inorganic-matrix-composites-used-for-strengthening-of-masonry-constructions-384>.

Fajfar Peter Analysis in Seismic Provisions for Buildings: Past, Present and Future [Book Section] // Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering. - [s.l.] : K. Pitilakis, 2018. - Vol. 46.

Iris Novelli Viviana Hybrid method for the seismic vulnerability assessment of historic masonry city centres. - London : UNIVERSITY COLLEGE LONDON, 2017. - p. 299.

Peretti Costanza HBim, la sfida del recupero degli edifici storici [Online] // 01building. - 31 12 2019. - 07 07 2020. - <https://www.01building.it/bim/hbim-sfida-recupero-edifici-storici/>.

Abdessamed Foufa A Contribution à la découverte des techniques constructives traditionnelles sismo-résistantes adoptées dans les grandes villes du Maghreb (Alger, Fès et Tunis) durant le XVIIIème siècle. - Algiers : Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme EPAU, 2007. - p. 300.

Acito Maurizio [et al.] Collapse analysis of the Clock and Fortified towers of Finale Emilia, Italy, [Journal] // Construction and Building Materials. - 20165. - 115. - pp. 193-213.

Angles Gil Maria Statistiques et analyse de données [Book Section] // Traité IC2, Logique floue, principes, aide à la décision / book auth. Bouchon-Meunier Bernadette and Marsala Christophe. - Paris : Hermes Science, 2003.

ATC 40 Seismic Analysis and Retrofit of Concrete Buildings. - California : Redwood city, 1996. - Vol. 1.

Atelier Kasbah Plan d'Aménagement Préliminaire, Projet de revalorisation de la Casbah d'Alger. - Algiers : [s.n.], 1981.

Atkinson Adrian, Chabou Meriem and Karsch Daniel Strategy for Local Sustainable Development: Urban renewal and transformation process of informel [Book]. - Berlin : [s.n.], 2008. - Univerlag tuberlin.

Ayadi Abdelhakim and Bezzeghoud Mourad Seismicity of Algeria from 1365 to 2013: Maximum Observed Intensity Map (MOI2014) [Journal] // Seismological Research Letters. - January 2015. - 1 : Vol. 86. - pp. 236-244.

Azhar Salman, Khalfan Malik and Maqsood Tayyab Building Information Modeling (BIM): Now and Beyond [Journal] // Australasian Journal of Construction Economics and Building. - 2012. - Vol. 12. - pp. 15-28.

B. Habieb Ahmad, Milani Gabriele and Milani Federico Seismic performance of masonry building isolated with low-cost rubber isolators [Book Section] // Earthquake Resistant

Engineering Structures XI / book auth. Brebbia C.A and Ivorra Chorro S. - [s.l.] : WIT Press, 2017. - illustrata.

Banfi F BIM orientation: grades of generation and information for different type of analysis and management process [Journal] // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. - 2017. - 26th International CIPA Symposium : Vols. XLII-2/W5. - p. 8.

Banfi Fabrizio HBIM, 3D drawing and virtual reality for archaeological sites and ancient ruins [Journal]. - [s.l.] : Virtual Archaeology Review, 2019. - Vol. 11.

Barazzetti L [et al.] Cloud-to-BIM-to-FEM: Structural simulation with accurate historic BIM from laser scans [Journal] // Simulation Modelling Practice and Theory. - 2015. - Vol. 57. - pp. 71-87.

Bekaert Geert A la recherche de Viollet-le-Duc [Book]. - Liège : Pierre Mardaga, 1980. - Architecture + recherches.

Bellanca Calogero Methodical Approach to the Restoration of Historic Architecture [Book]. - Perugia : [s.n.], 2008. - Alinea editrice.

Benhallou H Les Catastrophes Sismiques de la Région d'Echéliff dans le contexte de la Séismicité Historique de l'Algérie. Thèse de Doctorat Es-Sciences [PhD thesis]. - Algiers : IST-USTHB, 1985. - p. 294pp.

Beolchini Giovanni, Milano Lucia and Antonacci Elena Repertorio dei meccanismi di danno, delle tecniche di intervento e dei relativi costi negli edifici in muratura- Definizione di modelli per l'analisi strutturale degli edifici in muratura [Convenzione di Ricerca con la Regione Marche; Consiglio Nazionale delle Ricerche -Istituto per la Tecnologia delle Costruzioni -Sede di l'Aquila] / ed. Pasquale Claudio and Lemme Alberto. - Aquila : Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, delle Acque e del Terreno (DISAT) - Università degli studi di l'Aquila, 2005. - Vols. II-parte 1a.

Bertocchi D.P [et al.] Analisi critica del rapporto tra tipologia costruttiva e meccanismo di danno: applicazioni al centro storico di Sellano (PG) dopo il sisim del 1997 [Tesi di Laurea]. - Milano : Politecnico di Milano, 2000.

Binda L [et al.] Measuring masonry material properties: detailed results from an extensive experimental research. Part I: Tests on masonry components.. - Milan : Politecnico di Milano, 1996.

Binda L, Tiraboschi C and Mirabella Roberti G Experimental and numerical investigation on a brick masonry building prototype. - Milan : Politecnico di Milano, 1996.

Bonelli Renato Restauro architettonico. - Rome : Enciclopedia Universale dell'Arte, 1963. - pp. 344-351.

Borie Alain Méthode d'analyse morphologique des tissus urbains traditionnels [Book]. - [s.l.] : UNESCO, 1984.

Boughazi Khadidja [et al.] Seismic risk and urbanization: the notion of prevention. Case of the city of Algiers [Journal] // Procedia Economics and Finance 18. - 2014. - pp. 544 – 551.

Boughazi Khadidja [et al.] Seismic risk and urbanization: the notion of prevention. Case of the city of Algiers [Journal] // *Procedia Economics and Finance* 18. - 2014. - pp. 544 – 551.

Bryde David, Broquetas Martí and Volm Jürgen Marc The project benefits of Building Information Modelling (BIM) [Journal] // *International Journal of Project Management*. - 2013. - 7 : Vol. 21. - pp. PP 971-980.

BSI EN 1052-1 Methods of test for masonry- Determination of compressive strength. - London : BSI Standards Limited, 1991.

BSI EN-408 Timber structures — Structural timber and glued laminated timber — Determination of some physical and mechanical properties. - [s.l.] : BSI Standards Limited, 2012.

Caddemi Salvatore [et al.] La vulnerabilità sismica degli edifici storici in aggregato. “Nuove metodologie negli approcci speditivi e di modellazione strutturale” [Book]. - Rome : [s.n.], 2018. - Edizioni Efestò : p. 140.

Calabrese Angelo S [et al.] Application of Externally Bonded Inorganic-Matrix Composites to Existing Masonry Structures [Book Section] // *Buildings for Education. A Multidisciplinary Overview of The Design of School Buildings* / book auth. Della Torre Stefano [et al.]. - Cham : Springer, 2019.

Camerman C Les briques de limons et de schistes. - Brussels : Ministère des travaux publics et de la reconstruction, 1958. - p. 37.

Cardani Giuliana La vulnerabilità sismica dei centri storici: il caso di Campo Alto di Norcia. Linee Guida per la diagnosi finalizzata alla scelta delle tecniche di intervento per la prevenzione dei danni [Tesi di Dottorato]. - Milano : Politecnico di Milano, 2003.

CDWA Culture Directorate of the Wilaya of Algiers Casbah d'Alger [Online]. - 23 05 2017. - <http://www.casbahdalger.dz/historique.html>.

Chalhoub Michel Massifs rocheux: homogénéisation et classification numériques Transvalor [Book Section]. - [s.l.] : Presses des MINES, 2010.

Chergui Samia Construire, gérer et conserver les mosquées en al-Djaza'ir ottomane, XVIe-XIXe siècles [Book]. - Paris : PhD Thesis in Archeology and History of Art, University Paris-Sorbonne, 2007.

Cigni Giuseppe Il consolidamento murario Tecniche d'intervento [Book]. - Roma : [s.n.], 1983. - Edizioni Kappa.

Clementi F [et al.] Assessment of seismic behaviour of heritage masonry buildings using numerical modelling [Journal] // *Journal of Building Engineering*. - 2016. - pp. 29–47.

Clementi F [et al.] Assessment of seismic behaviour of heritage masonry buildings using numerical modelling [Journal] // *Journal of Building Engineering*. - 2016. - pp. 29–47.

CNR Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati a Matrice Inorganica . - Rome : CNR –

Commissione di Studio per la Predisposizione e l'Analisi di Norme Tecniche relative alle costruzioni, 2020.

Costantini Andrea Come rinforzare le pareti in muratura con i sistemi compositi FRCM? [Online] // Kimia Prodotti e Technologie per il Recupero Edilizio . - 30 07 2019. - 12 09 2020. - <https://www.kimia.it/it/blog/come-rinforzare-pannelli-in-muratura-con-i-compositi-frcm>.

Cucchi M [et al.] 8th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions // Optical system for real-time measurement of the absolute displacements applied to flat jack test. - Wroclaw : [s.n.], 15-17 10 2012.

Damasceno Jailton Carreteiro and Couto R.G Methods for Evaluation of Measurement Uncertainty [Book Section] // Metrology. - [s.l.] : IntechOpen, 2018.

DIGITAL CALIPER Instruction Manual [Online]. - : https://media.mwstatic.com/productdocuments/owners%20manual/297/national_metallic_digital_caliper_instructions.pdf.

DM (G.U. 5-2-1996, N. 29). Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche [Technical norms for constructions in seismic zones]. - 1996.

DM Norme tecniche per le costruzioni [Technical norms for the constructions]. - 2005.

Doulcier J, Pawlowski K and Sato L Revalorisation de la Casbah d'Alger [Book]. - Paris : UNESCO SHC, 1973.

DRC User Manual Penetrometro Malta SRM Version 1.0. - [s.l.] : DRC srl, 2015.

ELECTRICAL MEASUREMENT OF MECHANICAL QUANTITIES. Operating manual DD1. - [s.l.] : HBM. - p. 8.

EN 1015-11 Metodi di prova per malte per opere murarie - Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita. - London : BSI, 2019.

EN 1998-1 Design of structures. - Brussels : EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004.

EN1052-1 Methods of test for masonry. - London : BSI Standards Limited, 1999.

EN-408 Timber structures — Structural timber and glued laminated timber — Determination of some physical and mechanical properties. - [s.l.] : BSI Standards Limited, 2012.

EN772-1 Methods of test for masonry units - Part 1: Determination of compressive strength. - London : BSI British Standards Institution, 2011.

Eurocode 8 Eurocode 8 Elastic acceleration and displacement response spectra (for design of structures in the elastic range and calculation of displacements) [Online] // Eurocode applied. - 2017. - 18 09 2020. - <https://eurocodeapplied.com/design/en1998/elastic-response-spectrum>.

Fawad Ahmed Najam Nonlinear Static Analysis Procedures for Seismic Performance Evaluation of Existing Buildings – Evolution and Issues [Book Section] // Sustainable Civil Infrastructures. - Egypt : H. Rodrigues et al, 2017.

Fernandes Francisco M and Lourenco Paulo B Evaluation of the Compressive Strength of Ancient Clay Bricks Using Microdrilling [Journal] // Journal of Materials in Civil Engineering. - 2007. - 9 : Vol. 19. - pp. 791-800.

Formissano Antonio [et al.] A quick methodology for seismic vulnerability assessment of historical masonry aggregates [Book Section] // COST C26 Final Conference "Urban Habitat Constructions under Catastrophic Events" / ed. Mazzolani F.M. - London : CRC Press, 2010.

Formissano Antonio [et al.] Numerical calibration of an easy method for seismic behaviour assessment on large scale of masonry building aggregates [Journal] // Advances in Engineering Software. - 2015. - Vol. 80. - pp. pp 116-138.

Foufa Amina Abdessamed and Benouar D Investigation of the 1716 Algiers (Algeria) earthquake and the traditonal seismic preventive measures from historical documents sources [Journal] // 14 WCEE, The 14th Worl Conference on Earthquake Engineering. - 2008.

Freeman S.A The capacity spectrum method as a tool for seismic design [Journal] // Procedia. 11th ECEE. - Paris : [s.n.], 1998.

Freeman S.A, Nicoletti J.P and Tpll J.V [Journal] // Conference on Earthquake Engineering. - 1975.

FUSCO Giovanni L'analyses des espaces publiques. les places [Online]. - 2012. - 15 06 2020. - <http://unt.unice.fr/uoh/espaces-publics-places/approfondissement-theorique-lanalyse-typo-morphologique/>.

Galasco Alessandro, Lagomarsino Sergio and Penna Andrea ON THE USE OF PUSHOVER ANALYSIS FOR EXISTING MASONRY BUILDINGS [Journal] // First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (a joint event of the 13th ECEE & 30th General Assembly of the ESC). - Geneva : [s.n.], September 2006. - p. 1080.

Ghiassi Bahman and Milani Gabriele Numerical Modeling of Masonry and Historical Structures: From Theory to Application [Book]. - [s.l.] : Woodhead Publishing, 2019.

Giordano A, Mele E and De Luca A Modelling of historical masonry structures: comparison of different approaches through a case study [Journal] // Engineering Structures. - 2002. - pp. 1057–1069.

Giovanetti Francesco De la Casbah d'Alger [Journal] // Environmental Design: Journal of the Islamic Environmental Design. - 1992. - pp. 66-79.

Giovinazzi S, Balbi A and Lagomarsino S A vulnerability method for buildings into historical centres (in Italian) [Journal] // 11th Italian Congress "L'Ingegneria Sismica in Italia". - genoa : [s.n.], 2004.

Giuffrè A Sicurezza e conservazione dei centri storici. Il caso do Ortigia: codice di pratica per gli interventi antisismici nel centro storico [Book]. - Roma-Bari : Laterza, 1993.

Gravity Modelling: Forward Modelling of Real Data, Isle of Mull & North Sea case studies [Online]. - 06 10 2019. - http://geopixel.co.uk/g4g_lab3.html.

Hadjilah Asma and Chérif Nabila The Casbah of Algiers's Transformation Between 1833 and 1859: Expropriation, Concession, and Plot Remodeling [Journal]. - [s.l.] : Journal of Urban History, 2019. - 4 : Vol. 46.

Harbi Assia [et al.] Seismicity, seismic input and site effects in the Sahel—Algiers region(North Algeria) [Journal] // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. - 2007. - Vol. 27. - pp. 427-447.

Heap M.J [et al.] The permeability and elastic moduli of tuff from Campi Flegrei, Italy: implications for ground deformation modelling [Journal] // Solid Earth. - 2014. - Vol. 5. - pp. 25-44.

Himeur M.A Kasbah of Algiers: historical and cultural heritage in peril [Online]. - 11 11 2012. - 15 05 2017. - <http://focus-algerie.blogg.org/casbah-d-alger-patrimoine-historique-et-culturel-en-peril-a116340586> .

Hogan Richard 7 Steps to Calculate Measurement Uncertainty [Online] // isobudgets. - 16 07 2015. - 14 07 2020. - <https://www.isobudgets.com/7-steps-to-calculate-measurement-uncertainty/>.

ICOMOS CHARTE ICOMOS - PRINCIPES POUR L'ANALYSE, LA CONSERVATION ET LA RESTAURATION DES STRUCTURES DU PATRIMOINE ARCHITECTURAL. - Zimbabwe : ICOMOS, 2003.

ICOMOS The Nara document on authenticity. - Nara : [s.n.], 1994.

IDS IDS [Online]. - 15 03 2020. - <http://en.ids-imaging.com>.

ISO13061-17 specifies a method for determining the ultimate stress in compression parallel to grain of wood. - 2017. - p. 4.

Latka Dawid and Matysek Piotr Assessment of compressive strenght of lime mortar in the joints of brick walls- case study [Journal] // MATEc Web Conferences . - 2018. - 163.

Latka Dawid and Matysek Piotr Determination of Mortar Strength in Historical Brick Masonry Using the Penetrometer Test and Double Punch Test [Journal] // Materials. - 2020. - 2873 : Vol. 13.

Leslie Rahul The Pushover Analysis, explained in its Simplicity [Journal] // Procedia: Civil Engineering and Construction Review. - India : [s.n.], 2012. - pp. 118-126.

Liu Xila and Zhang Leiming Structural Theory [Book Section] // Bridge Engineering Handbook / book auth. Duan Wai-Fah Chen and Lian. - Boca Raton : CRC press, 2000.

Lombillo Ignacio [et al.] Mechanical characterization of rubble stone masonry walls using non and minor destructive tests [Journal] // Construc tion and Buildi ng Materia ls. - 2013. - Vol. 43. - pp. 266-277.

López-Arce Paula [et al.] Bricks in historical buildings of Toledo City: characterization and restoration [Journal] // Materials characterization . - 2003. - 1 : Vol. 50. - pp. 59-68.

Lourenco Paulo B, Fernandes Francesco M and Castro Fernando Handmade Clay Bricks: Chemical, Physical and Mechanical Properties [Journal] // International Journal of Architectural Heritage. - 2010. - 1 : Vol. 4. - pp. 38-58.

- Lubowiecka Izabela [et al.]** Historic bridge modelling using laser scanning, ground penetrating radar and finite element methods in the context of structural dynamics [Journal]. - [s.l.] : Engineering Structures, 2009. - Vol. 31.
- Mahindad Naima** Les différents systèmes constructifs et l'évolution des caractéristiques des matériaux archéologiques du XIIIe et au XIIe siècle en Algérie. - Algiers : Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme, 2017.
- Maio Rui [et al.]** Seismic vulnerability assessment of an old stone masonry building aggregate in San Pio delle Camere, Italy [Journal] // Second European conference on earthquake engineering and seismology. - 2014.
- Mallardo Vincenzo [et al.]** Seismic vulnerability of historical masonry buildings: A case study [Journal] // Engineering Structure. - 2008. - 30. - pp. 2223-2241.
- Marastoni Diego [et al.]** Combining Brazilian tests on masonry cores and double punch tests for the mechanical characterization of historical mortars [Journal] // Construction and Building Materials. - 2016. - Vol. 112. - pp. 112-127.
- Marelli Paulo** VULNERABILITA' SISMICA DI AGGREGATI EDILIZI COMPATTI IN MURATURA: UN CASO STUDIO AD ARSITA (TE) // Master Thesis. - Milan : Politecnico di Milano, 2019.
- Marini Alessandra** Il comportamento delle strutture in muratura sotto sisma - meccanismi di danno. - Bergamo : Università degli studi di Bergamo, 2015.
- Matteuzzi Elena** Tiranti e catene, un sistema efficace per il consolidamento di edifici storici [Online] // lavorincasa. - 18 12 2019. - 15 09 2020. - <https://www.lavorincasa.it/incatenamento-strutture-murarie/>.
- Mazzotti Claudio and Savoia Marco** Structural Characterization of an Historical Building by Means of Experimental Tests on Full-Scale Elements [Journal] // Advances in Civil Engineering. - 2017. - p. 15.
- Meier E.** WOOD! Identifying and Using Hundreds of Woods Worldwide [Book]. - Minnesota : The Wood Database, 2015. - p. 272.
- Meireles H and Bento R** Rehabilitation and strengthening of old masonry buildings. - [s.l.] : Relatório ICIST DTC nº 02/2013, 2013. - p. 27.
- Mendes Nuno and Lourenço Paulo B** Seismic Vulnerability of Existing Masonry Buildings: Nonlinear Parametric Analysis [Book Section] // Seismic Assessment, Behavior and Retrofit of Heritage Buildings and Monuments / book auth. Pscharis Ioannis N, Pantazopoulou Stavroula J and Papadrakakis Manolis. - [s.l.] : Springer, 2015.
- M'Hamsadji K** Casbah d'Alger, autrefois, El Qaçba zemân [Book]. - Algiers : Office des publications universitaires, 2007.
- Milani Gabriele and Valente Marco** Comparative pushover and limit analyses on seven masonry churches damaged by the 2012 Emilia-Romagna (Italy) seismic events: Possibilities of non-linear

finite elements compared with pre-assigned failure mechanisms [Journal] // Engineering Failure Analysis. - 2015. - 47. - pp. 129-161.

Missoum Sakina Alger à l'époque ottomane, la médina et la maison traditionnelle [Book]. - Aix en Provence : Edisud, 2003. - p. 235.

Mochi Giovanni and Predari Giorgia La vulnerabilità sismica degli aggregati edilizi, una proposta per il costruito storico [Book]. - Rome : [s.n.], 2016. - EdicomEdizioni : p. 191.

Montheillet Frank and Briottet Laurent Endommagement et ductilité en mise en forme [Online] // Techniques de l'ingénieur. - 10 06 2009. - 23 08 2020. - <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/mise-en-forme-des-metiaux-aspects-rheologiques-et-metallurgiques-42476210/endommagement-et-ductilite-en-mise-en-forme-m3032/>.

Murphy Maurice Historic Building Information Modelling (HBIM) For Recording and Documenting Classical Architecture in Dublin 1700 to 1830 [Journal] // PhD thesis. - [s.l.] : Trinity College Dublin, 2012. - p. 150.

Naatje Alexander In FEA, what is linear and nonlinear analysis? [Online] // Femto Engineering. - 22 05 2017. - 23 08 2020. - <https://www.femto.eu/stories/linear-non-linear-analysis-explained/#:~:text=A%20nonlinear%20analysis%20is%20an,between%20applied%20forces%20and%20displacements.&text=This%20is%20opposed%20to%20the,and%20therefore%20a%20different%20solver..>

Nanni Antonio, Arboleda Diana and De Caso Francisco Historic Infrastructure Rehabilitation with Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composites [Online] // ascecuba. - 30 11 2016. - 12 09 2020. - https://www.ascecuba.org/asce_proceedings/historic-infrastructure-rehabilitation-with-fabric-reinforced-cementitious-matrix-frcm-composites/.

Niglio Olimpia Le carte del restauro. Documenti e Norme per la conservazione dei beni architettonici e ambientali [Book]. - Rome : ARACNE, 2012.

Nostradamus Ductilité [Online] // Wikipedia L'encyclopédie libre. - 14 06 2020. - <https://fr.wikipedia.org/wiki/Ductilit%C3%A9>.

NTC Aggiornamento "Norme Tecniche per le Costruzioni". - Rome : Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2019.

O.P.C.M 3274 First elements regarding general criteria for the seismic classification of the national territory and technical norms for the constructions in seismic zone. - 2003.

O.P.C.M 3431 Further modifications and integrations to OPCM 3274/03. - 2005.

O.P.C.M Ulteriori modifiche ed integrazioni all'OPCM 3274/03 [Further modifications and integrations to OPCM 3274/03. - 2005.

Oulebsir Nabila Les usages du patrimoine. Monuments, musées et politique coloniale en Algérie (1830-1930) [Book]. - Paris : [s.n.], 2004. - Editions la maison des sciences de l'homme .

Oussadou F Contribution à la sismotectonique de l'Algérie occidentale par la sismicité, les mécanismes au foyer, les mesures de déformation et la tectonique générale [Magister Thesis]. - Algiers : USTHB, 2002. - p. 133PP.

Pasqualon Gianluca Come si comportano le strutture in muratura sotto l'azione del sisma: i vari meccanismi di collasso [Online] // Ingenio. - 15 01 2020. - 22 09 2020. - <https://www.ingenio-web.it/22914-come-si-comportano-le-strutture-in-muratura-sotto-lazione-del-sisma-i-vari-meccanismi-di-collasso>.

Peirs G La brique, Fabrication et traditions constructives. - France : Groupe Eyrolles, 2005.

Perrey Alexis Note sur les tremblements de terre en Algérie et dans l'Afrique septentrionale [Book]. - Dijon : [s.n.], 1847. - pp. 299-323.

Pulikowski Adam A Expertise géotechnique, Atelier de conservation des monuments historiques. - Warsaw : Atelier château royal, 1979. - p. 20.

Quaglini Virginio PhD course: EXPERIMENTAL METHODS FOR STRUCTURAL MECHANICS: Key principles in metrology and measurement system analysis. - Milan : Politecnico di Milano, 2019.

Quattrini Ramona, Pierdicca Roberto and Morbidoni Christian Knowledge-based data enrichment for HBIM: Exploring high-quality models using the semantic-web [Journal]. - [s.l.] : Journal of Cultural Heritage, 2017. - Vol. 28.

Rapoport Amos The Nature and Definition of the Field [Book Section] // House Form and Culture. - New Jersey : Prentice-Hall, 1969.

Ravéreau André La casbah d'Alger et le site créa la ville [Book]. - Paris : Sindbad, 1989. - p. 228.

Restauration Les théories du XIXe siècle : Viollet-le-Duc, Ruskin et Boito [Online] // La restauration du patrimoine . - 09 01 2015. - 10 04 2020. - <http://restauration-patrimoine.eklablog.com/i-les-theories-du-xixe-siecle-viollet-le-duc-ruskin-et-boito-a114226482>.

Riedo Patrick Objectif BIM [Online]. - 2012. - 07 07 2020. - <http://www.objectif-bim.com/index.php/bim-maquette-numerique/le-bim-en-bref/la-definition-du-bim>.

Roussel J Les zones actives et la fréquence des séismes en Algérie [Journal] // Bull Soc Hist Nat Afr Nord. - 1973. - 3 : Vol. 64. - pp. 11-227.

RPA DTR, Document Technique Réglementaire B C 2 48, RPA. Règles Parasismiques Algériennes 99/ version2003. - Algiers : Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme: Centre nationale de Recherche Appliquée en Génie-parasismique, 2003. - p. 101.

Ruskin John Les sept lampes de l'architecture [Book]. - Royaume-Uni : Smith, Elder & Co, 1849. - p. 268.

Sadholz A, Muir C and Perruchio R Limit analysis to assess the seismic capacity of Diocletian's Frigidarium [Book Section] // Structural Analysis of Historical Constructions: Anamnesis, Diagnosis, Therapy, Controls: Proceedings of the 10th International Conference on Structural

Analysis of Historical Constructions / book auth. Van Balen Koen and Verstrynghe Els. - Leuven : CRC Press, 2016.

Sahlin Structural masonry [Book]. - 1971. - Englewood cliffs.

Sante olivito Renato and Porzio Saverio A new multi-control-point pushover methodology for the seismic assessment of historic masonry buildings [Journal]. - [s.l.] : Journal of Building Engineering, 2019. - Vol. 26.

Shaw travel in the regency of Algiers [Book]. - Tunis : [s.n.], 1980. - 2nd : p. 104.

Tanguay Mathieu Conserver ou restaurer ? La dialectique de l'œuvre architecturale : Histoire d'un débat qui a contribué à la formation de la culture de la conservation du patrimoine bâti [Thèse de doctorat]. - Montréal : Université de Montréal: faculté de l'Aménagement, 2012. - p. 268.

The calibration certificate. - [s.l.] : Accredia No. 1262 2018 FOR Instrum (100KN). .

Tso W.K and Moghadam A.S Pushover procedure for seismic analysis of buildings [Journal] // Progress in Structural Engineering and Materials. - 1998. - Vol. I(3). - pp. 337-344.

UBC-V2 Chapter 16: STRUCTURAL DESIGN REQUIREMENTS. - California : International Conference of Building Officials, 1997.

Ulukan M and Arslan H Developing a new authenticity rating system on architectural conservation [Book Section] // Sustainable City VII (2 Volume Set) Urban Regeneration and Sustainability / book auth. Pacetti M [et al.]. - Southampton : WIT press, 2012. - Vol. 155.

UNESCO Kasbah of Algiers [Online]. - 30 03 2020. - <https://whc.unesco.org/en/list/565/>.

UNI EN 338 conifere e di pioppo Classe C. - 2016.

Urbanski A [et al.] STATIC PUSHOVER ANALYSIS. ZSOIL®.PC Report 070202. - Préverenges : ZSoil, 2007.

Valentini Stefano GLI INCATENAMENTI DELLE STRUTTURE IN MURATURA [Online] // Ingegneri. - 02 09 2016. - 15 09 2020. - <https://www.ingegneri.cc/gli-incatenamenti-delle-strutture-in-muratura.html>.

Vallucci Sara Tecniche di intervento su edifici in muratura: le catene [Online] // Teknoring. - 29 10 2018. - 15 09 2020. - <https://www.teknoring.com/guide/guide-ingegneria/tecniche-intervento-edifici-muratura-catene/>.

Vicente Romeu [et al.] Evaluation of Strengthening Techniques of Traditional Masonry Buildings: Case Study of a Four-Building Aggregate [Journal] // Journal of performance of constructed facilities. - 2011. - 3 : Vol. 25. - p. 202.

Vincenzo Rendere antisismica una casa in pietra o mattoni - costo ristrutturazioni [Online] // Studio Madera architettura e ingegneria . - 10 12 2019. - 14 09 2020. - <https://www.studiomadera.it/news/274-casa-antisismica>.

Vinci Michele I tiranti in acciaio nel calcolo delle costruzioni in muratura [Book]. - Palermo : Dario Flaccovio, 2014. - Dario Flaccovio Editore.

Viskovic Alberto Seismic Retrofitting for Masonry Historical Buildings: Design Philosophy and Hierarchy of Interventions [Book Section] // Handbook of Research on Seismic Assessment and Rehabilitation of Historic Structures / book auth. Asteris Panagiotis G., Plevris, Vagelis. - [s.l.] : IGI Global, 2015.

Vogt Jean Mouvements de terrain associés aux séismes en Afrique du Nord. [Journal] // Méditerranée. - 1984. - 1.2 : Vol. 51. - pp. 43-48.

W. Caves Roger Encyclopedia of the City [Book]. - Abingdon and New York : Routledge, 2005. - p. 564.

Wilaya d'Alger PPSMVSS (Règlement du Plan Permanent de Sauvegarde et de Mise en Valeur du Sous-secteur Sauvegardé). - Algiers : Executive Decree corresponding n12-133 corresponding to 21 march 2012 of 28 Rabie Ethani 1433, 2012. - p. 54.

Zouaoui Amine M, Djebri Boualem and Capsoni Antonio From Point cloud to HBIM to FEA, the case of a Vernacular Architecture: Aggregate of the Kasbah of Algiers [Journal] // Journal on Computing and Cultural Heritage. - 2020. - 1 : Vol. 1.

Zouaoui Amine Mohamed La réhabilitation créative: La greffe architecturale, un moyen d'actualisation et de pérennité de l'image du monument historique. - Algeri : Ecole Polytechnique d'Archietcture et d'Urbanisme EPAU, 2016

IV Annexes

A1

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE LA CULTURE
AGENCE NATIONALE
DES SECTEURS SAUVEGARDES

REF N° : 289/ANSS/2018

ALGER, LE 23 JUL. 2018

وزارة الثقافة
الوكالة الوطنية
للقطاعات المحفوظة
مرجع رقم: / 2018
الجزائر.

A
Madame la Directrice Générale
De l'Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme « EPAU »

Objet : Demande d'autorisation

Madame ;

En réponse à votre demande, portant sur l'autorisation de réalisation d'un relevé architectural et au prélèvement de quelques échantillons à la Casbah d'Alger au profit de Monsieur ZOUAOUI Mohammed Amine (doctorant en 2^{ème} année LMD au LVAP), j'ai l'honneur de vous informer que nous répondons favorablement à votre demande, sous réserve de l'accord du Ministère de la Culture.

Veuillez agréer, Madame la Directrice Générale, mes salutations distinguées.

LA DIRECTRICE/interim

MERAZKA.N

الوكالة الوطنية للقطاعات المحفوظة	
الزواوي محمد أمين	
2018 365	و ق م /
27 SEP. 2018 التاريخ	

DAR EL KADI 17 RUE HADJ OMAR CASBAH/ALGER

دار القاضي 17 شارع الحاج عمر القصبه/الجزائر

CONTACT : Email : anss-dg@hotmail.com / Tél. : 021. 43. 85. 92/ 84. 28.

23 JUL. 2018 4:32PM PT

FROM: 0014138518

FROM: cult@univ-alger

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE LA CULTURE

Direction de la protection légale des biens culturels

Et de la valorisation du patrimoine culturel

Sous-direction de la Recherche et la Valorisation

du Patrimoine Culturel

N° 667 DPLBCVC/MC/18

N° 23/SDCL/MC/18

2018 09 13

AUTORISATION

Conformément aux dispositions de la loi 98-04 du 15 juin relative à la protection du patrimoine culturel, la présente autorisation est délivrée par Monsieur le directeur de la protection légale des biens culturels et de la valorisation du patrimoine culturel à :

Nom et Prénom : ZOUAOUI Mohamed Amine ;

Qualité : Doctorant en deuxième année LMD au LVAP ;

Institution : l'Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme (Le Moudjahid Hocine Ait Ahmed)

Nature de l'opération demandé : Relevé architectural de quatre maisons (scanner laser 3D) et Prélèvement d'échantillons de matériaux de construction ;

Nature d'échantillons : Briques en terre cuite (6 au maximum) et une quantité de mortier d'argile (500 g à 1kg);

Objectif de l'opération : Préparation d'une thèse de doctorat ;

Wilaya et lieu : La Casbah d'Alger, Wilaya d'Alger ;

Formalité obligatoire : Etablissement de Conventions ;

Etablissement (s) concerné (s) : Agence National des Secteurs Sauvegardés.

Pour toute forme d'exploitation autre que celle de la formation, l'intéressé et la Directrice de l'Agence National des Secteurs Sauvegardés, doivent arrêter d'un commun accord, les modalités d'exploitation dans le cadre des lois et règlements en vigueur notamment les règles applicables en matière de droits d'auteur et de droits voisins.

كاتب مدير تامين الممتلكات
 الوكالة الوطنية
 للاحتراف والتراث

Copie : Mm^{de} Directrice de l'Agence National des Secteurs Sauvegardés.

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE LA CULTURE
AGENCE NATIONALE
DES SECTEURS SAUVEGARDES

REF N° : 219/ANSS/2018
ALGER, LE 01 OCT. 2018

وزارة الثقافة
الوكالة الوطنية
للقطاعات المحفوظة

مرجع رقم: / 2018
البرائن. في

PV de constat relatif au prélèvement d'échantillons
à la Casbah d'Alger

Etaient présents :

- FERTALA Saad : - Architecte à l'ANSS
- ZOUAOUI Mohamed Amine : - Architecte et doctorant au LVAP- EPAU

Additivement à la réponse de l'ANSS à « Monsieur le Directeur de la Protection Légale des Biens Culturels et de la Valorisation du Patrimoine Culturel (REF.N° : 219/ANSS/2018), ayant pour objet demande d'un avis portant sur l'autorisation d'exportation des échantillons prélevés de maisons faisant parti de l'îlot entouré par: la rue Sidi Dris HAMIDOUCE au Nord Ouest, la rue Mouaha au N-E, la rue N'fissa au S-E et la rue Rabah SMALA au S-O, Casbah d'Alger, pour les analyser et les étudier au laboratoire technique en Italie au profit de Mr ZOUAOUI Mohamed amine, Architecte et doctorant à l'EPAU.

En ce jour du trente septembre 2018, une sortie sur site a été effectuée par un architecte de l'ANSS en présence de la personne concernée, a permis de vérifier l'emplacement des prélèvements, ainsi que le nombre d'échantillons par rapport aux fiches techniques soumises. La visite s'est terminée par une séance de travail au siège de l'ANSS, suite à laquelle il a été noté ce qui suit :

Le prélèvement de:

- Une quantité de mortier d'argile : environ 1kg ;
- Un fragment de mur composé de 06 briques en terre crue et deux briques séparées ;
- Trois morceaux de rondin de Thuya ;
- Deux morceaux de volige

Les échantillons prélevés sont des parties de bâtisses effondrées situées dans l'îlot cité en amont. Le doctorant est tenu de respecter les responsabilités et les obligations qui lui incombent, et tâchera de nous remettre une copie de son travail et résultats une fois finalisé. L'ANSS est favorable pour l'analyse des échantillons prélevés au niveau des adresses sus indiquées.

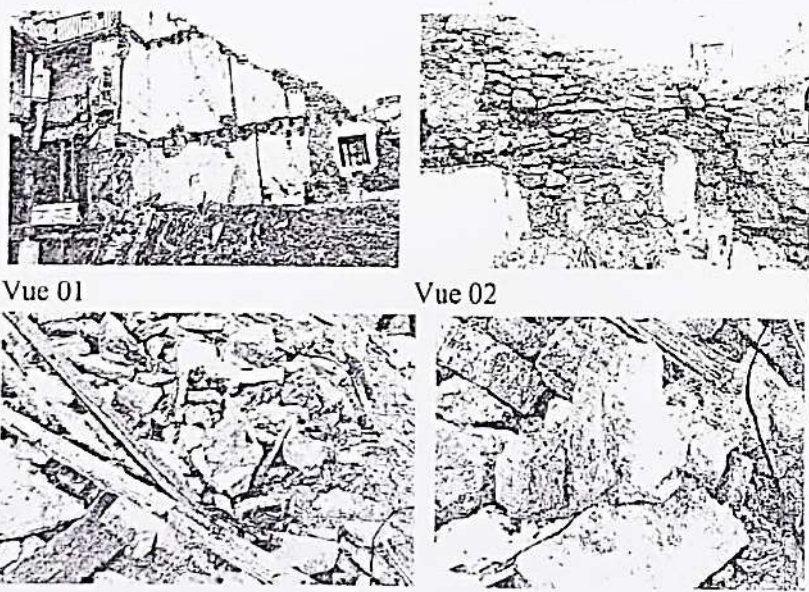
Fin de PV



DAR EL KADI 17 RUE HADJ OMAR CASBAH/ALGER

دار القاضي 17 نهج حاج محمد القسية/البرائن

CONTACT : Email : anss-dg@hotmail.com / Tél. : 021. 43. 85. 92/ 84. 28.

Description	Fiche technique de prélèvement d'échantillon Illustrations
<u>Source du prélèvement:</u> Intersection de la rue Sidi Driss Hamidouche et la rue Smala Rabah <u>Types de prélèvement:</u> 1- Briques en terre cuite Quantité : 6 2- Mortier d'argile Quantité : 500g-1kg 3- Rondin de bois Quantité : 1 4- Fragment volige Quantité : 3	  Représentation du site de prélèvement Source: Mise en conformité du PPSMVSS casbah d'Alger, typologies du bâti  Vue 01 Vue 02 Vue 03 Vue 04 Source des illustrations: auteur

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
RÉPUBLIQUE ALGERIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE LA CULTURE

Le Ministre



وزارة الثقافة

الوزير

رقم 149 أ.و.و

03 OCT. 2018

الجزائر في،

Autorisation D'exportation

Conformément aux dispositions des articles 60 et 62 de la loi n°98-04 du 20 safar 1419 correspondant au 15 juin 1998 relative à la protection du patrimoine culturel, Monsieur Azzedine MIHOUBI, ministre de la culture autorise monsieur, ZOUAOUI Mohamed Amine, Doctorant en deuxième année LMD au LVAP ; l'Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme (Le Moudjahid Hocine Ait Ahmed), à transporter des échantillons périssables, dans liste jointe, prélevés de la Casbah d'Alger vers l'Italie, et ce dans le cadre de la formation doctorale intitulée : « Patrimoine et cadre bâti ancien ».

Les échantillons seront remis à l'laboratoire spécialisé en Italie, pour effectuer des essais techniques.

03 OCT. 2018

Fait à Alger

Le ministre de la culture.

(Signature and stamp of the Minister of Culture)
الوزير
أ.و.و. 149

A2

 **PKZ**
ATELIERS DE CONSERVATION DES MONUMENTS HISTORIQUES
ATELIER „CHATEAU ROYAL”
ENTREPRISE D'ETAT 00-288 VARSOVIE, 2, rue SWIĘTOJANSKA

PROJET: CITADELLE - ALGER

CONTRAT No 64
DE 23.01.1979

ADRESSE ALGER

TYPE D'ETUDE:
EXPERTISE GEOTECHNIQUE

AUTEUR:
M. Adam PULAKOWSKI, ing. dipl.

- 3 -

1. PREAMBULE

Les examens du sol sous la Citadelle ont été effectués à Alger, par l'équipe PKZ-Budimex au cours de la première moitié de l'année 1980.

Le travail a été exécuté conformément au Contrat No 64, du 23.01.1979 /Annexe I/3, par. 1.3./, à base des recherches, examens et sondages ainsi qu'à base des recherches de l'équipe des géophysiciens de l'Entreprise des Recherches Géophysiques de Varsovie, qui ont élaboré leur sujet conformément au Contrat cité ci-haut /Annexe I/3 par.1.5/.

L'Expertise Géophysique doit être considérée comme un complément des recherches géophysiques et examinée conjointement à l'Expertise de structure sous l'aspect de conservation.

C'était pour la première fois que des recherches de ce type ont été effectuées dans la Citadelle, afin de procéder à la reconnaissance générale de cet ensemble historique, pour le futur avant-projet de son adaptation et reconstruction.

A la fin de l'Etude un plan de situation est joint avec 8 esquisses présentant des données provenant de divers sondages.

2. OBJECTIF ET PORTEE DE L'ETUDE

L'objectif de l'Etude consiste à la constatation des conditions de sol et d'eau, existantes sous l'ensemble historique de la Citadelle ainsi qu'à l'indication des travaux de protection nécessaires, voire recommandés, à entreprendre au cours de l'exécution des travaux de reconstruction et de conservation.

- 4 -

La connaissance de ces données est indispensable à la prise des décisions correctes au stade de l'avant-projet, puis au stade des projets techniques de l'adaptation et de la reconstruction.

Les examens ont concerné l'ensemble du territoire de la Citadelle, y compris le terrain qui l'entoure pour présenter une image plus complète du problème.

Les constructions très denses de la Casbah, situées sur le versant descendant vers la mer /dans la direction Est/, sont soumises aux règles géotechniques différentes. Ce terrain n'a pas été examiné et bien que son sol ait une structure semblable à celle du sol rocheux de la Citadelle, aucune conclusion par analogie ne doit en être tirée.

3. SITUATION ET DONNEES HISTORIQUES

Etant donné qu'il s'agissait d'un ouvrage de défense, la Citadelle a été située à l'endroit le plus haut du terrain bâti de la citée de l'époque - la Casbah actuelle - et elle formait l'extrémité des deux remparts, protégeant la ville du Sud et du Nord, de la Citadelle jusqu'au bord de la mer.

La première phase de la construction de la Citadelle se situe au début du XVIème siècle, les remparts extérieurs avec les bastions ont alors été créés, auxquels on a adjoint par la suite de bâtiments divers.

C'était durant la période coloniale que les changements les plus importants ont été effectués; la Citadelle a été percée par une rue. Dans le massif rocheux situé du côté du Boulevard de la Victoire, des galeries ont été

- 5 -

percées pour l'adduction d'eau, des rampes et des accès aux bastions ont été modifiés. Les bâtiments, en revanche, n'ont pas modifiés leur volume essentiel après 1830, c'est-à-dire après la prise de l'Algérie par l'armée française.

Il faut noter ici un tremblement de terre qui a eu lieu à Alger, en 1716. Le séisme n'a pas provoqué alors de dégâts visibles, et on ne peut que deviner que de nombreux murs en briques ont été appuyés par la maçonnerie dans les axes des colonnes de pierre /sous les arcs/, pour renforcer ainsi des éléments porteurs des bâtiments, affaiblis voire fissurés.

Le terrain destiné à la construction de la Citadelle formait un point culminant local. Les différences les plus grandes des niveaux se trouvent du côté Sud entre la rampe Rabah Hassani et le Voulvard de la Victoire.

Le haut plateau élevé sur lequel se trouve la Citadelle, a une pente générale, peu accusée, dans la direction Sud-Est. La région du côté Nord /actuellement - casernes/ constitue un prolongement du haut-plateau, peu différent par son niveau de celui de la Citadelle.

4. SOL ROCHEUX DE LA REGION DE LA CITADELLE

La Citadelle est fondée sur les roches de carbonate, constituant des formations métamorphiques, désagrégées dans leur couche supérieure, superficielle.

Ces formations se caractérisent par leur plissement prononcé avec la disposition alternée des couches dures, compactes et des roches plus faibles.

Les roches compactes comprennent dans leur composition du

- 6 -

dolomite, du calcite, du quartz ainsi que du pyrite et du limonite. Les roches plus faibles ce sont les schistes à séricite avec des parties en talc et des filons de quartz; les plans de clivage comprennent de petits filons de calcite et de séricite, avec du hématite et du limonite.

Les roches de schistes comportent une zone profonde de désagrégation et d'érosion par l'eau. Les plans de glissement, compte tenu de la présence du talc et de l'humidification par les eaux pluviales, créent des tendances à l'apparition des éboulements, ce qui théoriquement peut mettre en danger des parties des ouvrages situées sur des versants des roches d'une telle structure géologique.

La région portant le No 16 sur le plan de situation constitue un exemple type, directement visible, des plissements et de la disposition alternée des couches compactes et celles plus faibles.

Dans la région No 15 le sol rocheux du côté de la rue dépasse son niveau d'environ 2-4 m; plus loin, un vieux mur se trouve sur le rocher, construit par une méthode type: les couches extérieures maçonnées en briques au mortier de chaux, remplissage intérieur en pierres, gravats et terre, mélangé à la pâte de chaux.

Du côté de la rue R. Hassani la partie haute extérieure de ce mur se détache et menace de tomber; par contre, on peut observer les couches intérieures découvertes, sur lesquelles on ne voit aucune action négative des eaux pluviales et aucun tassement.

- 7 -

Les régions désignées par les No No 11, 13 et 14 comportent des roches assez compactes, sortant légèrement au-dessus du terrain, formant une fondation naturelle.

Les endroits situés à l'intérieur de la Poudrière /No No 9 et 10/ accusent la présence des schistes sous ses murs et piliers. La roche est gris-bleuâtre et comporte des plans de clivage très rapprochés.

L'endroit No 12, sur la cour entre la Mosquée Ancienne et la Cuisine du Dey, comporte à environ 60 cm de profondeur un sol rocheux en schistes gris à sérécite. La présence du sol rocheux a été indiquée par les examens sismiques /voir "Etudes géophysiques" - Annexe 5a/ et par un sondage direct.

Le sondage a laissé trouver des traces d'un vieux mur de briques et de pierres, de 35 cm d'épaisseur, fondé directement sur un sol dur rocheux. Parallèlement au mur /à la distance d'environ 70 cm/ se trouve un tube de fonte détruit, faisant partie le plus probablement, d'une vieille canalisation de la période coloniale.

Les couches rocheuses ont une pente vers la Mosquée Ancienne d'où peut-être, l'humidité excessive des murs des caves de celle-ci.

5. FONDATIONS DES BATIMENTS

Pour avoir des renseignements sur les fondations des bâtiments de la Citadelle, des sondages ont été exécutés, qui ont confirmé l'hypothèse, basée sur l'examen du terrain, que le sol, servant à la construction des remparts et des murs des bâtiments, se composait en règle générale des couches peu profondes des roches, désagrégées plus ou

moins dans leur partie haute.

A la fin de la présente Etude des esquisses sont jointes, exécutées selon les mesures des sondages avec un plan de leur situation.

Pour le choix des emplacements des sondages le Palais des Beys a été pris surtout en considération, à cause de son état très mauvais de conservation de ses murs extérieurs et, aussi, à cause des couches très défavorables, obliques, des roches plus faibles /schistes à sérinite/.

Dans le voisinage des sondages No 1 à 5 le sol rocheux descend nettement dans la direction de la rue R. Hassani. Plusieurs puissants arbres d'eucalyptus poussent ici.

On a constaté que les racines des arbres n'ont aucune action directe sur les parties inférieures des murs, mais elles influencent certainement d'une façon négative le relâchement des couches hautes de la roche - elles constituent donc un facteur d'accélération du processus de la désintégration. Les sondages No 3 et 4 laissent constater que l'ancien niveau du terrain attaché directement au mur était plus bas - on le constate à base des "bandes de façade" bien conservées, présentes au-dessous du niveau actuel du terrain.

Le mur de soutènement en béton, situé parallèlement au mur extérieur du Palais des Beys, a été exécuté au cours de la période coloniale, afin peut-être de conserver les couches rocheuses obliques du sol contre la désagrégation et éboulement.

Le mur de soutènement accuse quelques fissures importantes, verticales, provoquées par l'action visible des racines des

- 9 -

arbres d'eucalyptus, qui poussent juste près du mur - du côté du Palais.

Une image bien intéressante présente le sondage No 8. Il en résulte que les murs les plus anciens des premiers bâtiments, à l'emplacement desquels la Poudrière plus tard a été construit, étaient mieux construits techniquement et fondés directement sur la roche massive.

En revanche, les murs de la Poudrière ont été construits sur une couche de la roche cassée, soumise aux déplacements locaux, privée par la pluie de ses parties plastiques, etc. Il faut noter néanmoins ici que le bombage et la chute des couches de mort des murs dans le couloir entre les murs extérieurs de la Poudrière ne sont pas provoqués par un mauvais comportement des fondations. Il s'agit d'un mur mal exécuté, plus exactement de sa couche de remplissage en terre avec une quantité minimale de pâte de chaux, ce qui a été traité en détail dans le cadre de l'Expertise de structure sous l'aspect de conservation.

Le sondage No 7 laisse apparaître un mur élargi à sa base, formant, pour ainsi dire, une banquette des fondations. L'enduit présent sur cette banquette témoigne également d'un niveau plus bas du terrain dans le passé.

Le sondage No 6 laisse voir que la surface ancienne du Bastion 3 se trouvait au niveau inférieur d'un mètre environ, de celui du gazon actuel.

6. ANALYSE DU SOL SOUS LES FONDATIONS

Le fait essentiel, résultant des examens, constituent les fondations des remparts et des murs des bâtiments, situées directement sur le sol rocheux, présent juste sous la surface du terrain, ou bien recouvert d'une couche de humus, de 40-60 cm d'épaisseur.

De forts plissements et les couches alternées des roches compactes et celles plus faibles, des schistes, sont susceptibles, dans des conditions spécialement défavorables de l'humidité et de surcharge locale, de provoquer des tendances à la création des éboulements partiels ou des arrachements.

Le tremblement de terre noté à Alger en 1716 n'a pas causé de modifications dans les couches des fondations, ce qui pouvait être influencé par élévation homogène du terrain de la Citadelle, plus sure que des dispositions descendantes du sol rocheux sous les constructions de la Casbah.

Les fissures présentes dans les remparts et les murs des bâtiments de la Citadelle /décrites et analysées dans "l'Expertise de structure sous aspect de conservation"/ disparaissent en règle générale au-dessus du terrain, témoignant ainsi de la statique suffisante des fondations.

Un problème tout à fait différent est celui des murs des bâtiments surélevés au cours d'une période plus récente, sur le système existant des remparts ou des bastions.

Les exemples en sont fournis par: le Harem Ancien et le Palais des Beys. Le Harem Ancien constitue un exemple d'une surélévation exécutée correctement, car ses murs minces en maçonnerie n'accusent pas des fissures de structure plus importantes.

- 11 -

En revanche, le Palais des Beys, près de son angle Sud de la construction haute, accuse d'importantes déformations des murs. Ce problème est traité en détail dans "l'Expertise de structure sous aspect de conservation".

Le sol qui a servi à la construction du bâtiment surélevé est constitué d'une couche de terre et de gravats, avec de la pâte de chaux de stabilisation.

Comme l'indiquent les examens, le degré de saturation de cette couche par la chaux est très divers, depuis le minimum à celui correct /vérifié déjà alors par une expérience de plusieurs années!/.

Une influence très importante est également exercée ici par l'état correct de la préparation et de la malaxation de la couche avec la chaux.

Dans les cas où la quantité correcte de chaux a été utilisée et le malaxage bien fait, une structure suffisamment stable pour les conditions atmosphériques locales était créée, qui s'est bien conservée au cours de 5 siècles.

Dans le cas de l'angle évoqué plus haut du Palais des Beys /cette région a été marquée sur le plan de situation!/ un tassement partiel du "sol de terre" a eu lieu, provoqué par l'enlèvement par les eaux des particules fines, création des cavernes, s'écroulant sous l'action de la charge. La raison directe en a été l'humidité constante à long terme /110 ans au moins/, apportée par les tuyaux de descente de pluie endommagés à la partie intérieure en terre des remparts.

La région en question comporte actuellement 7 tuyaux de descente des eaux pluviales, situés à l'intérieur du Palais

- 12 -

des Beys, collectant les eaux d'une surface importante des terrasses. Il faut admettre que la moitié des eaux évacuées actuellement s'infiltreront dans la structure de terre et de maçonnerie des murs et des remparts.

7. RECOMMANDATIONS TECHNIQUES

- 7.1. Le sol rocheux, constituant la couche directe sous les fondations, est suffisamment stable et n'exige pas de renforcements.
- 7.2. Aux études des projets de l'adaptation de la Citadelle le principe de la protection du sol de terre doit être adopté contre l'humidité, l'érosion par l'eau et la désagrégation des roches. Le boisement prévu du terrain doit également être protégé, car les racines des arbres mènent d'une part à la destruction des couches extérieures des roches et, d'autre part, évacuent l'humidité de la couche de remblai en terre.
- 7.3. En tenant compte de ce qui précède, on recommande de prévoir la surface de la cour et des bastions munie des pentes, assurant l'évacuation rapide des eaux pluviales.
- 7.4. Pour protéger les couches peu profondes du sol rocheux près des bâtiments, on recommande de les couvrir d'une couche de terre et d'exécuter un revêtement dur ou un gazon - avec une pente de quelques pourcents à partir des murs.
- 7.5. Quant aux remparts extérieurs du Palais des Beys, il faut tenter de conserver le mur de soutènement existant actuellement. Entre les remparts et le mur de

- 13 -

soutènement on recommande d'exécuter un revêtement dur avec une pente /p.ex. en pierres/ ou un gazon, avec une pente à partir des murs.

7.6. Le mur de soutènement existant est à prolonger jusqu'au sondage No 3, la partie au-dessus du sol formée selon le par. 7.5, ce qui apportera la protection contre la désagrégation et l'érosion des couches obliques des roches de schistes à séricite.

7.7. Pour les raisons de conservation on ne recommande pas de défricher les eucalyptus qui poussent ici, en revanche l'implantation d'arbres nouveaux doit être réfléchie et faite, éventuellement, plus près de la rue.

7.8. Les parties basses découvertes des murs de la Poudrière doivent être protégées contre le relâchement des roches cassées. Cela peut être exécuté par une maçonnerie appropriée avec le remplissage soigné des vides, stabilisant les parties basses des murs. Pour cette raison, on doit insister sur l'exécution du sol définitif à l'intérieur de la Poudrière.

7.9. Un sérieux problème est celui de la stabilisation des couches de remblai sous les murs dans la région de l'angle Sud du Palais des Beys /traité plus haut, au par. 6/. Les murs déformés ont été qualifiés à remaçonner. Le remaçonage peut avoir lieu après le renforcement et la mise en place de la protection contre l'enlèvement par l'eau et le tassement des couches de remblai de gravats et de terre.

7.10. En étudiant le problème de la transformation des parties déformées et affaiblies de l'angle du Palais

des Beys, il faut analyser des systèmes de renforcement du sol. Ci-dessous on indique deux variantes de solutions, possibles à exécuter en fonction des possibilités techniques de l'entreprise d'exécution, à savoir:

7.10.1. Après le démontage des murs qualifiés à être réparés, élever la couche de gravats et de terre situées sous ces murs, jusqu'à 80-100 cm de profondeur, puis la remplir au béton maigre, avec une part de gravats. Il est souhaitable d'enlever les couches du sol en présence d'un archéologue, car on peut espérer des découvertes intéressantes.

7.10.2. La stabilisation du sol peut être faite par la méthode d'injection, effectuée sous la pression d'environ 5-8 at., à la pâte de ciment /ou bien de chaux/, modifié par adjuvants chimiques, améliorant sa pénétration et adhérence de la pâte.

Un matériel spécialisé est indispensable à l'exécution d'une telle injection, desservie par une équipe qualifiée d'exécution.

Les ouvertures doivent être forées jusqu'à 3-4 m de profondeur obliques /sous l'angle de 70-80°/, espacées t.l. env. 50-60 cm, à l'aide d'un trépan de mines à choc et à rotation.

Dans l'ouverture forée un tube d'acier doit être placé, perforé dans sa partie basse, fileté dans la partie haute. Sur le tube ainsi placé on visse une tête avec un conduit, par lequel on introduit à l'aide d'une pompe de la pâte sous pression souhaitée, il pénètre dans le tube, puis passe par la perforation dans les cavernes et fissures du sol.

- 15 -

7.10.3. Les travaux d'injection doivent être menés sous le contrôle technique strict, à base des essais effectués sur place. La profondeur des ouvertures, leur angle d'inclinaison, espacement, densité des injections et la pression appliquée doivent être corrigées en fonction des conditions locales.

7.10.4. La méthode d'injection peut également être appliquée avec succès au renforcement des fondations de la colonne de marbre de la pièce AE-208 du Palais du Dey. Le nombre approximatif des forages est indiqué à 10-12, d'environ 2-3 m de profondeur.

7.11. Quant aux murs neufs, ils doivent être fondés directement sur la roche, ou dans le cas d'un remblai de terre, sur un sol en béton de gravats.

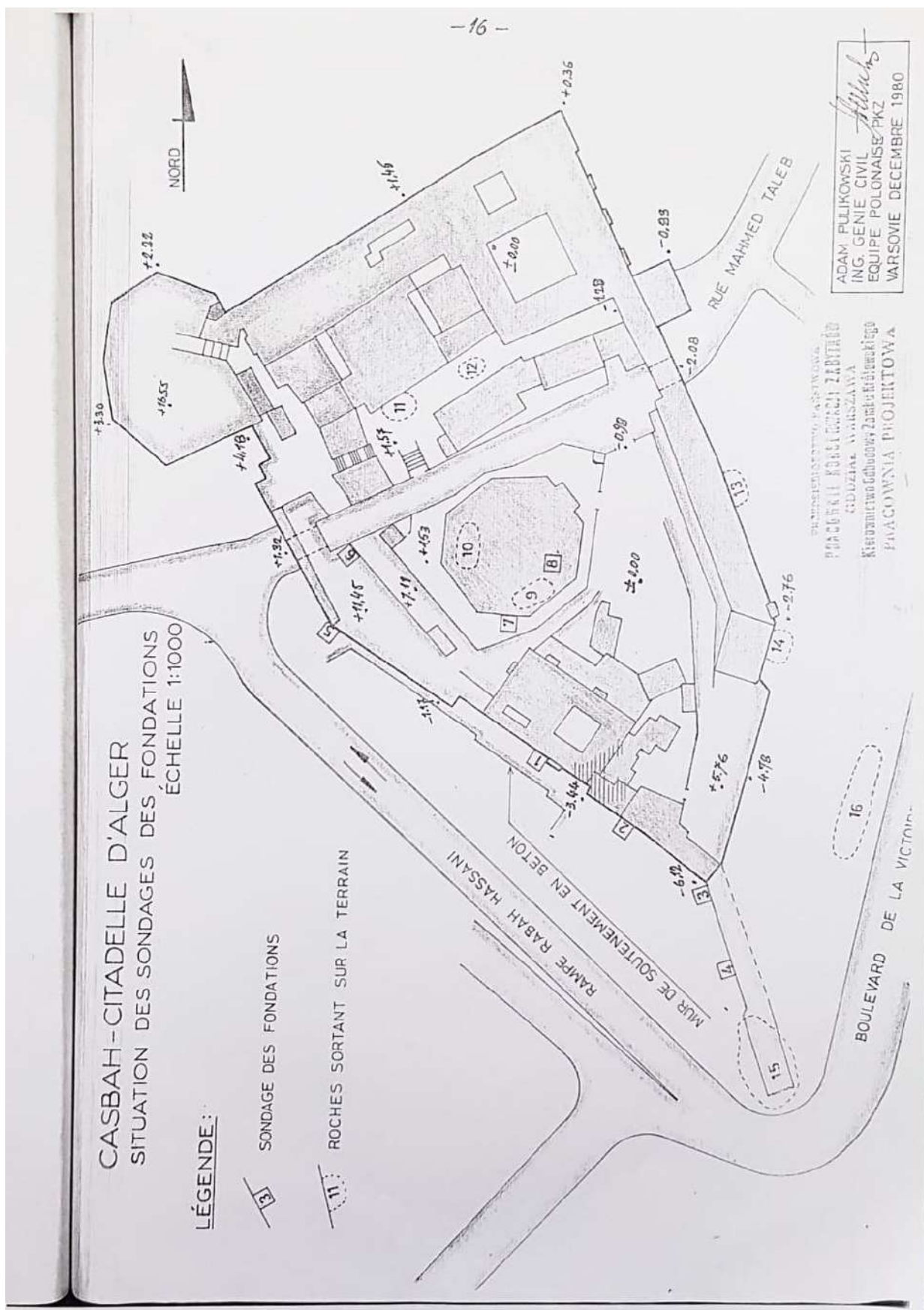


M. A. PULIKOWSKI, ing.dipl.

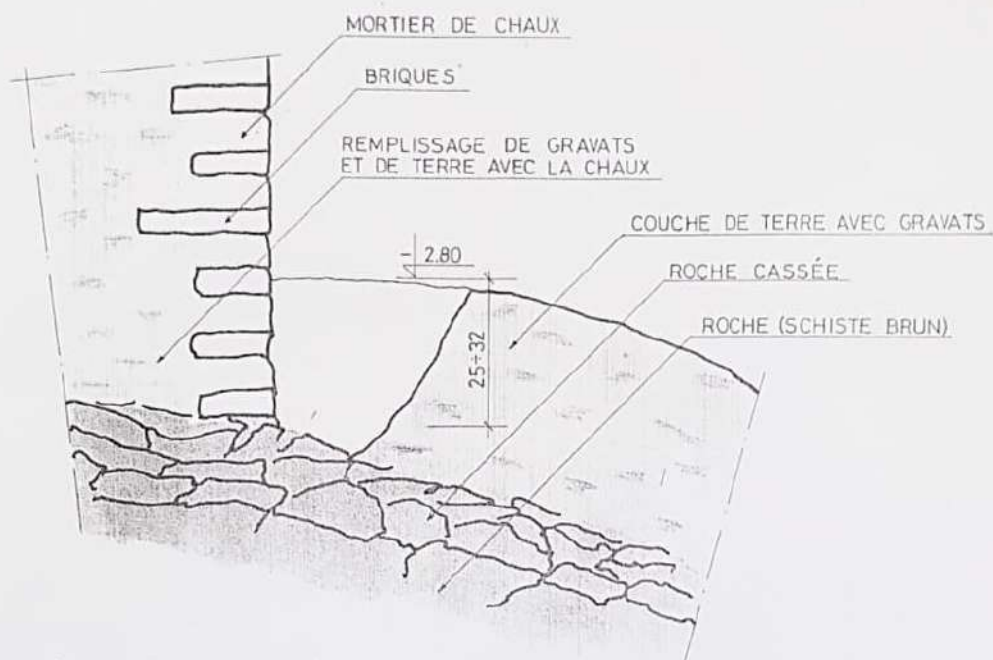
Pièces jointes:

Plan de situation et esquisses
des sondages des fondations
/au nombre de 8/

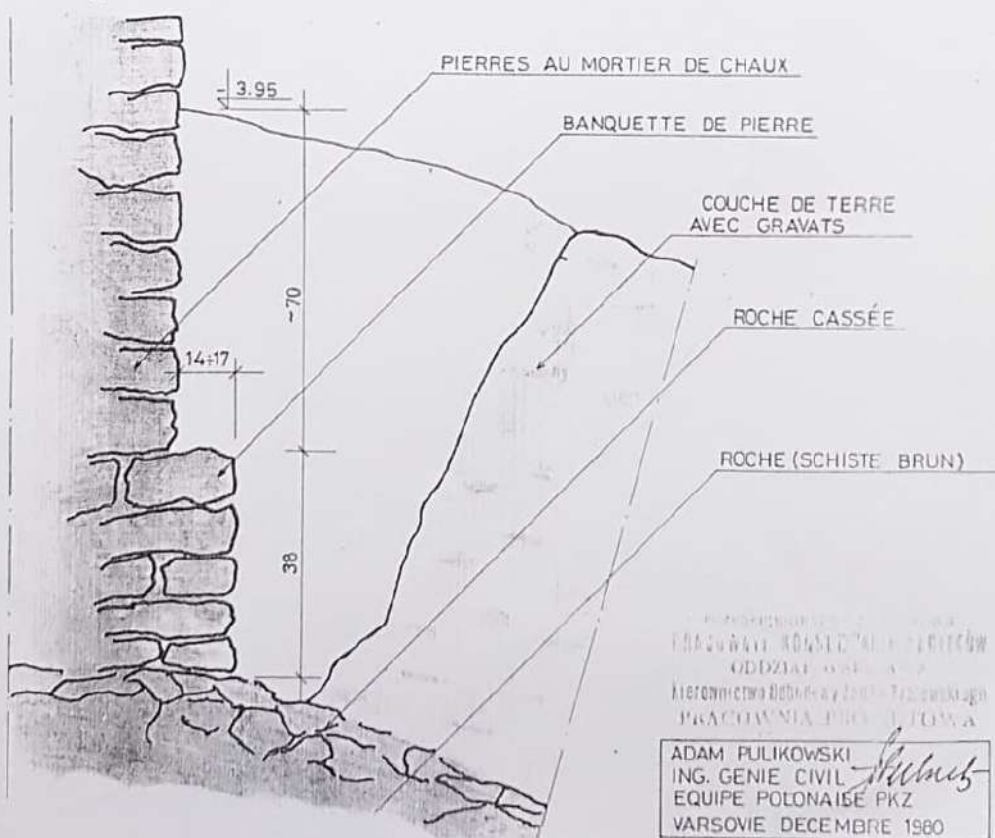
Varsovie, décembre 1980



SONDAGE 1

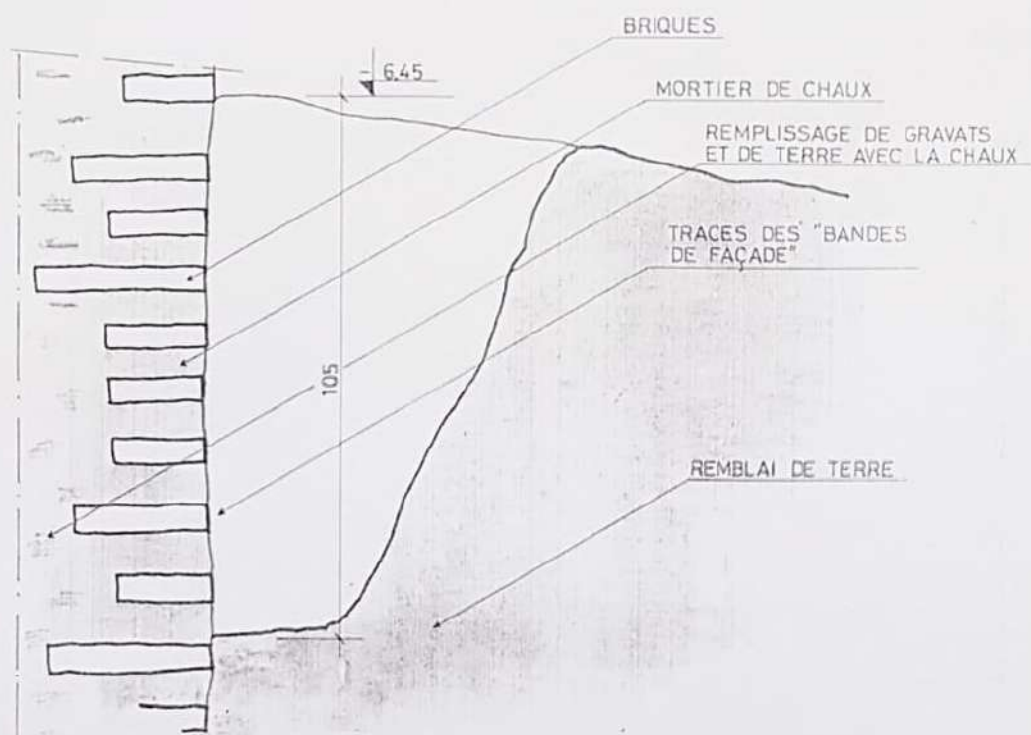


SONDAGE 2

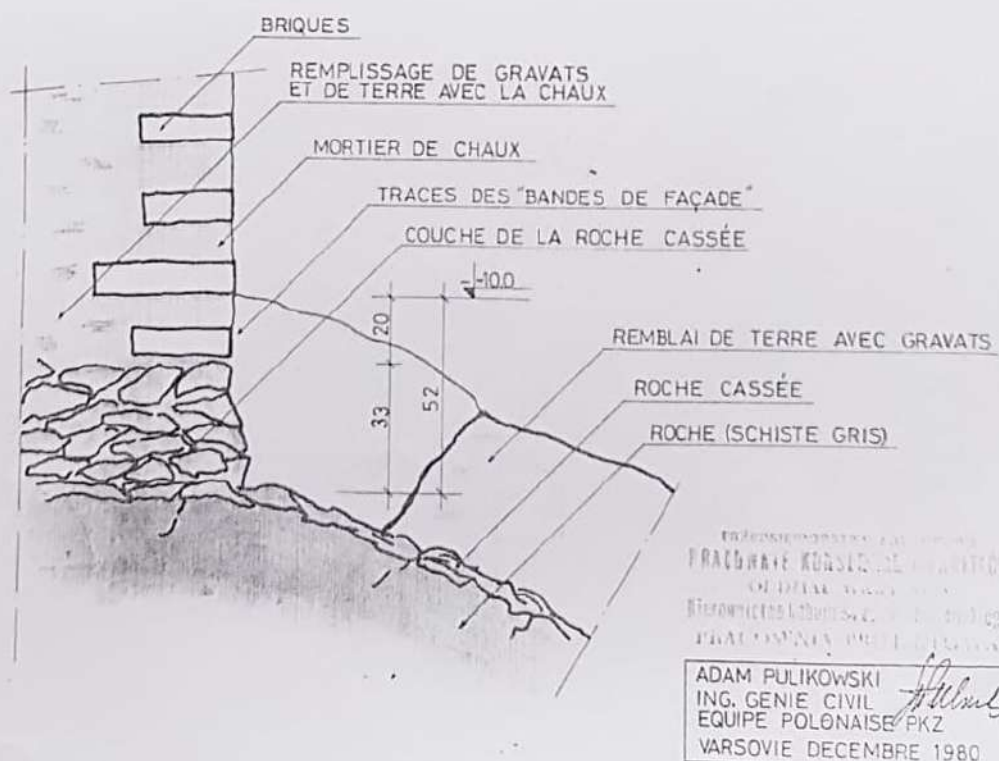


SONDAGE 3

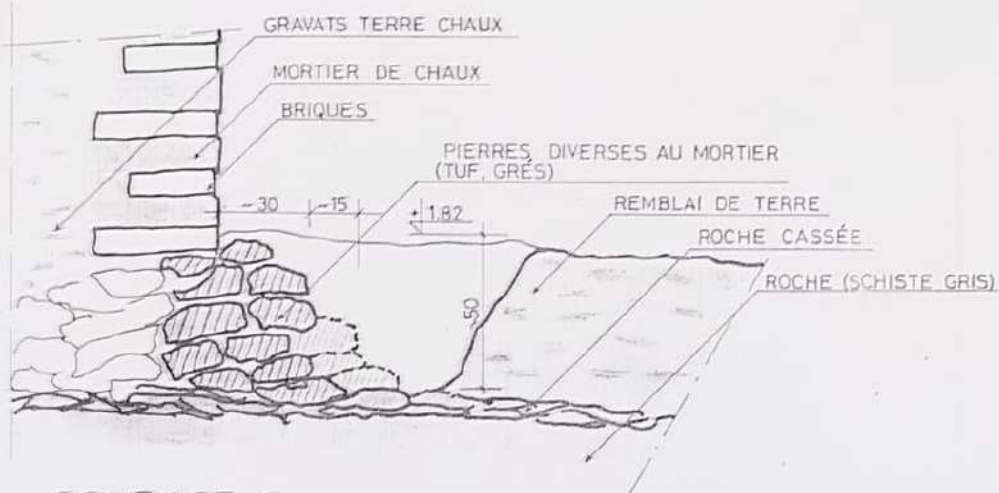
- 18 -



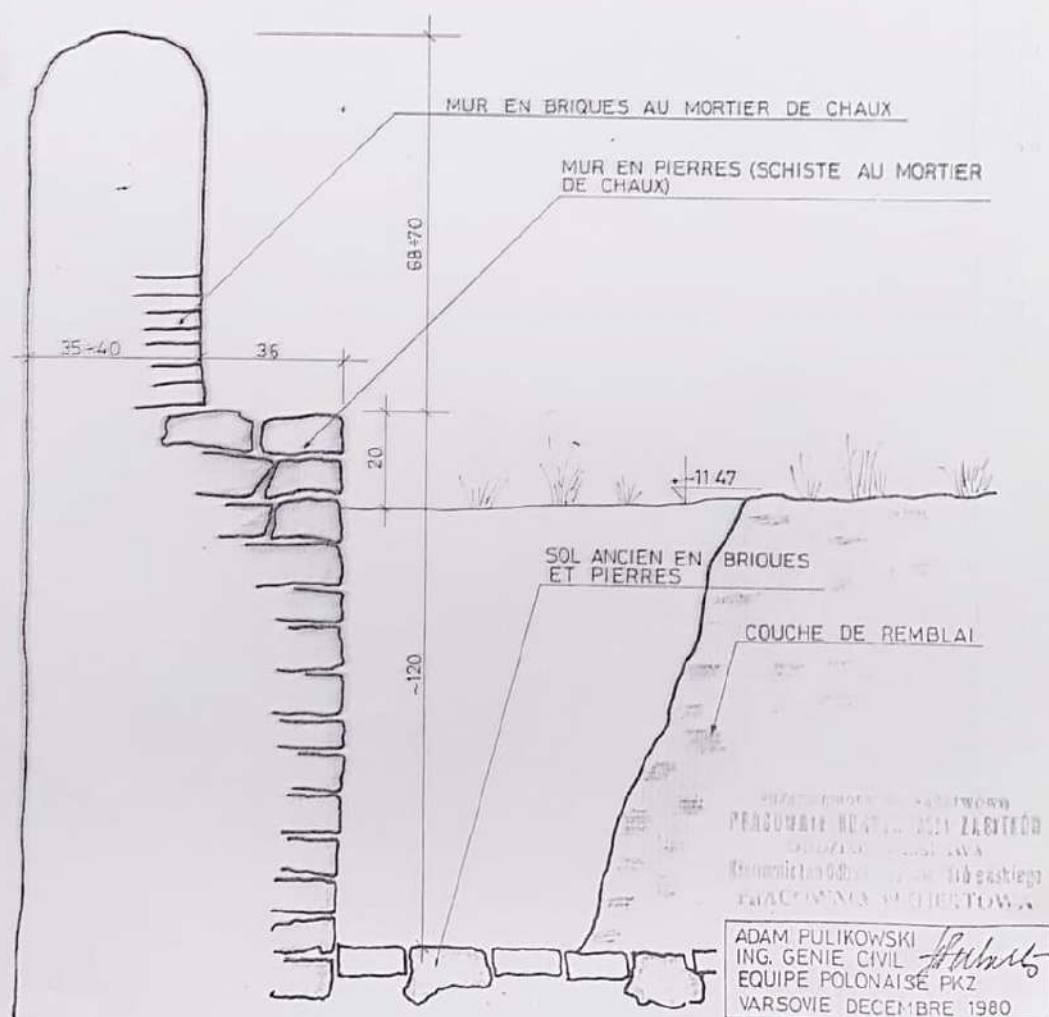
SONDAGE 4



SONDAGE 5

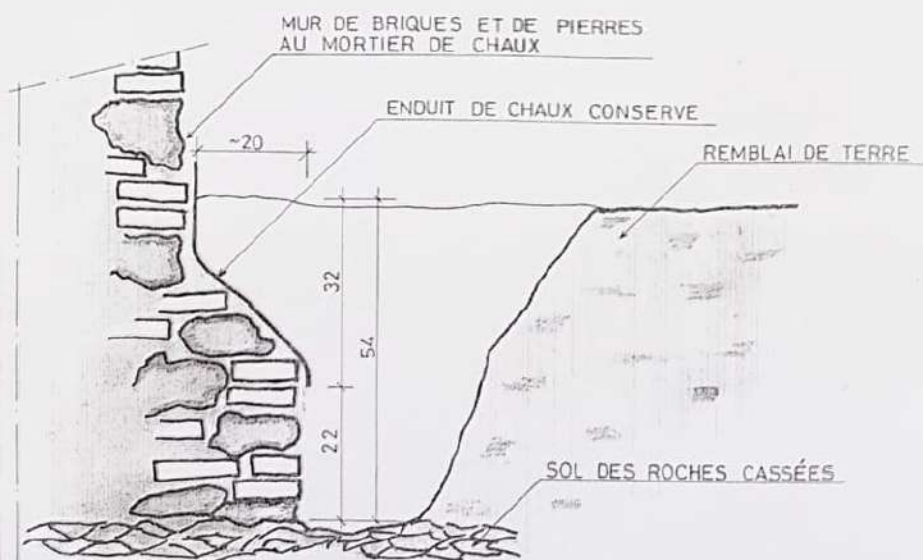


SONDAGE 6

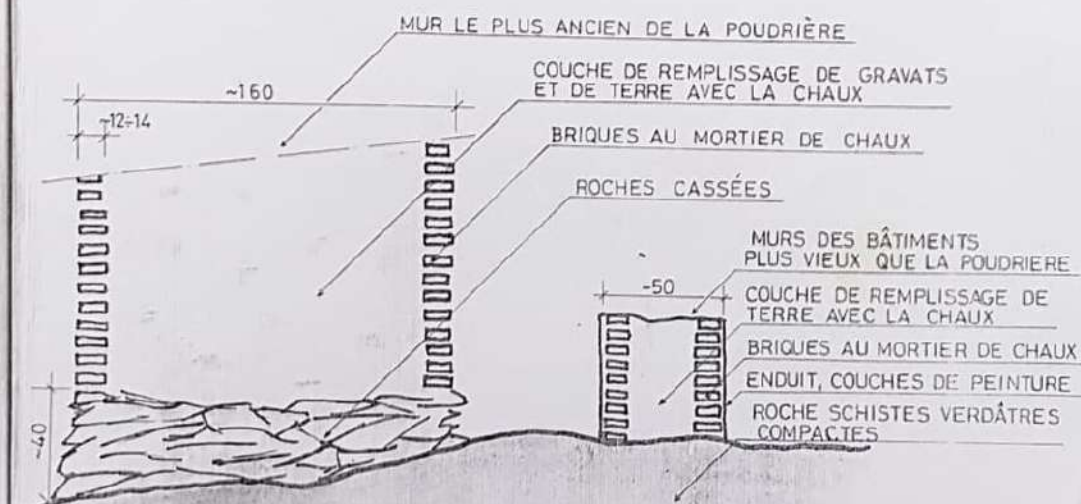


SONDAGE 7

-20-



SONDAGE 8



PROJECTION DE L'ÉTAT ACTUEL
D'APRÈS LES DONNÉES DE LA PARTITION
GÉNÉRALE DES TRACÉS
RÉVISÉES PAR LE COMITÉ D'ÉTUDES
POLONAISES DE LA DÉFENSE

ADAM PULIKOWSKI
ING. GENIE CIVIL
EQUIPE POLONAISE PKZ
VARSOVIE DECEMBRE 1980

A3

CU	CP	Top displacement (mm)							
		Disaggregated				Aggregated			
		+X	-X	+Y	-Y	+X	-X	+Y	-Y
Constructive Unit 1	CP 1-1	6.32	5.83	5.18	3.57	3.54	3.67	3.58	3.22
	CP 1-2	2.63	1.98	3.11	1.31	1.44	1.08	2.28	1.15
	CP 1-3	2.80	2.03	4.58	2.16	1.59	1.21	3.37	1.86
	CP 1-4	2.98	1.80	3.43	1.36	1.66	1.07	2.26	1.26
	CP 1-5	6.53	4.08	3.70	1.54	4.32	2.31	2.24	1.42
Constructive Unit 2	CP 2-1	2.76	3.56	12.9	4.38	2.63	2.84	2.66	2.76
	CP 2-2	1.8	2.93	12.75	3.82	1.61	1.59	2.16	2.29
	CP 2-3	1.62	2.64	15.31	6.41	1.78	1.40	2.78	1.93
	CP 2-4	1.66	2.56	8.23	3.65	1.95	1.35	2.82	2.02
	CP 2-5	2.85	3.06	8.33	3.89	2.76	2.42	3.07	2.18
	CP 3-1	1.5	1.49	6.66	2.53	1.80	1.52	2.62	1.52
	CP 3-2	1.85	1.7	6.58	2.42	1.64	1.50	2.62	1.40
	CP 3-3	1.69	1.67	5.8	2.35	1.54	1.10	2.69	1.44
	CP 3-4	1.44	1.46	5.96	2.39	1.53	1.13	2.55	1.62
	CP 3-5	2.12	2.21	7.68	3.58	2.14	2.00	3.19	2.04
	CP 3-6	1.35	1.52	8.81	3.72	1.80	1.33	6.94	1.53
Constructive Unit 3	CP 5-1	6.70	3.39	4.60	3.94	8.50	4.96	7.45	6.24
	CP 5-2	5.63	3.70	4.29	3.66	7.33	5.40	6.04	6.09
	CP 5-3	6.44	4.00	4.07	3.07	9.03	6.34	6.13	1.44
	CP 5-4	4.76	3.85	5.34	3.92	6.07	5.18	6.07	6.23
	CP 5-5	3.59	3.82	5.44	3.50	4.52	4.97	4.61	5.34
	CP 5-6	5.07	4.25	5.30	3.94	6.72	6.32	6.52	6.47
	CP 5-7	3.45	2.19	3.92	2.65	4.15	2.30	6.22	4.14
	CP 5-8	2.74	2.38	5.41	2.29	3.44	2.84	5.52	4.14
	CP 5-9	2.70	3.71	5.11	3.37	3.23	4.11	5.16	5.21
	CP 5-10	5.34	4.02	5.63	3.97	7.00	6.15	7.91	6.98
Constructive Unit 4	CP 4-1	2.36	1.52	15.06	2.33	2.01	1.42	5.76	1.52
	CP 4-2	6.01	2.90	14.57	3.13	4.69	2.70	7.62	2.70
	CP 4-3	2.66	1.72	13.63	2.24	2.07	1.59	9.15	1.71
	CP 4-4	2.36	2.06	1494.25	5.52	1.87	1.65	88.10	3.47
	CP 4-5	3.14	2.12	33.19	2.88	2.77	2.07	4.29	2.29
	CP 4-6	2.52	1.70	28.52	2.48	2.17	1.51	3.72	1.68
	CP 4-7	2.49	2.04	33.76	3.05	2.22	1.91	5.44	1.96
	CP 4-8	2.68	2.12	37.43	3.42	2.39	2.41	5.50	2.41
	CP 4-9	2.95	1.31	7.29	2.14	1.99	1.69	3.93	1.37
	CP 4-10	2.45	1.80	15.71	2.38	2.38	1.22	2.68	1.57

